

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

КУЧВАРА ІВАН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.9.04; 621.941

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ
ЕЛІПСНИХ ГВИНТОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИН**

05.02.08 – технологія машинобудування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2016

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
Пилипець Михайло Ількович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя,
завідувач кафедри технології машинобудування

**Офіційні
опоненти:**

доктор технічних наук, професор
Марчук Віктор Іванович,
Луцький національний технічний університет,
завідувач кафедри приладобудування

кандидат технічних наук, доцент
Воронцов Борис Сергійович,
Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля,
доцент кафедри прикладної механіки та металургії

Захист відбудеться 10 червня 2016р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.03 Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

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

Автореферат розіслано «10» травня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.Є. Дячун

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан розвитку машинобудування в умовах ринкової економіки вимагає нових шляхів підвищення експлуатаційних і технологічних параметрів деталей машин, технологічного оснащення, що дасть змогу покращити якість продукції та зробити виробництво гнучким і швидко переналагоджуваним на різні типорозміри деталей машин, кількість яких визначається потребами ринку.

Для сучасного вітчизняного та зарубіжного машинобудування характерне розширення номенклатури деталей машин різних класів, в тому числі і гвинтових. Серед зазначених гвинтових деталей машин важливе місце посідають гвинтові профільні заготовки (ГПЗ), з яких отримують деталі робочих органів гвинтових конвеєрів та гвинтових змішувачів. Дані машини широко застосовуються у харчовій, хімічній, переробній промисловості, і особливо у сільському господарстві для транспортування зернових, приготування кормів.

У технологічних лініях приготування кормових сумішей завершальною операцією є змішування компонентів, яке здійснюється в спеціальних пристроях – змішувачах кормів порційної або безперервної дії. В якості робочого органу для змішувачів безперервної дії доцільно використовувати кулачковий гвинтовий робочий орган. Вихідною заготовкою для такого робочого органу може бути навита на еліпсну оправу спіраль з кроком рівним товщині стрічки – гвинтова еліпсна заготовка (ГЕЗ). Наступне формування її на заданий крок забезпечить утворення гвинтової кулачкової деталі шнекової заготовки кулачкового робочого органу.

З літературних джерел відомі методи навивання спіралей шнеків, проте, як свідчать результати аналізу, навивання на еліпсні оправу не досліджене.

Тому вирішення наукового завдання, яке полягає у розробленні та практичній реалізації раціональних технологічних процесів виготовлення ГЕЗ формуванням на еліпсну оправу є актуальним, доцільним, значущим і перспективним для машинобудівної галузі України та інших держав.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Виконана дисертаційна робота є частиною наукових досліджень, які виконувалися на кафедрі «Технології машинобудування» згідно тематики дослідницької роботи ТНТУ імені Івана Пулюя № ДІ 204-13 «Розробка та впровадження енергоефективних конструкцій та ресурсозберігаючих технологій виготовлення смугових гвинтових спіралей енергетичних установок» (номер державної реєстрації 0113U000255).

Мета і задачі дослідження. *Мета роботи* – розробити технологічні передумови ресурсозберігаючих технологій виготовлення ГЕЗ деталей робочих органів з підвищенням їх ефективності.

Для досягнення мети в роботі поставлені наступні задачі:

- провести аналіз відомих технологічних процесів (ТП) виготовлення ГПЗ та на цій основі вдосконалити технологію виготовлення ГЕЗ із подальшим розвитком теоретичних передумов і технологічного спорядження;

- розробити математичну модель формоутворення еліпсних гвинтових заготовок і дослідити геометричні параметри спорядження та силові параметрами технологічних процесів їх формоутворення;

- розробити динамічну модель процесу проточування профільних гвинтових канавок із визначенням силових параметрів процесу різання;
- дослідити процес зміцнення зовнішньої крайки гвинтових робочих органів в холодному і гарячому станах для підвищення експлуатаційної надійності і довговічності;
- спроектувати та виготовити функціонально здатні зразки технологічного спорядження для формоутворення ГЕЗ деталей робочих органів та проточування гвинтових канавок;
- провести комплекс експериментальних досліджень і виробити практичні рекомендації щодо вибору спорядження та режимів формоутворення ГЕЗ, а також дослідити вплив режимів різання і геометричних параметрів профільних гвинтових канавок на силові параметри процесу різання;
- вивести регресійні залежності для визначення сили гнуття притискним роликком стрічкових заготовок залежно від товщини H і ширини B стрічки та половини меншої осі еліпса b при навиванні стрічки для різних матеріалів та визначення величини сили різання P_r залежно від величини подачі S , глибини різання t та швидкості різання V ;
- розробити інженерну методику проектування технологічного процесу і технологічного спорядження для виготовлення еліпсних гвинтових робочих органів.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення заготовок деталей еліпсних гвинтових робочих органів.

Предмет дослідження – спосіб формоутворення і закономірності впливу елементів технологічного спорядження на процес формоутворення.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проведено з використанням фундаментальних засад технології машинобудування, інформатики, теорії пружності та пластичного деформування, теоретичної механіки, інженерної творчості. Апробація розроблених алгоритмів, програм і методик проводилась методом комп'ютерного моделювання. Результати експериментальних досліджень одержано за допомогою спеціально розробленого спорядження з використанням сучасних засобів та методів вимірювань. Статистичне оброблення експериментальних даних проводилось з використанням прикладних програм для ПЕОМ.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі теоретичних досліджень:

- отримали подальший розвиток теоретичні положення формоутворення гвинтових елементів способом навивання на еліпсну оправу, виведено аналітичні залежності для розрахунку силових параметрів процесу навивання, та їх зв'язок з необхідними конструктивними параметрами технологічного спорядження;
- отримали подальший розвиток моделі проточування профільних гвинтових канавок, на основі якої виведені залежності для визначення силових параметрів процесу точіння;
- досліджено процес обкочування зовнішньої крайки гвинтових робочих органів в холодному і гарячому станах, виведено розрахункові залежності для визначення силових параметрів процесу, з метою підвищення їх експлуатаційної надійності і довговічності;
- розроблено математичну модель профілювання пустотілих еліпсних заготовок, що дає змогу визначити їх основні параметри.

Практичне значення одержаних результатів:

- спроектовано та виготовлено експериментальні зразки технологічного спорядження для виготовлення ГЕЗ;
- експериментально підтверджено теоретичні залежності для визначення впливу геометричних параметрів стрічки та еліпсної оправы на силові параметри процесу навивання, виведено регресійні залежності для визначення впливу параметрів процесу різання на величину сили різання P_p та сили навивання на еліпсну оправу залежно від параметрів заготовки і оправы;
- розроблено конструкції нових пристроїв та обладнання для виготовлення еліптичних гвинтових заготовок;
- спроектовано пристрій для заміру конструктивних параметрів ГЕЗ «Шнекомір».

Технічна новизна виконаних розробок захищена 7-ма деклараційними патентами України на корисні моделі. Ефективність розроблених конструкцій пристроїв та обладнання підтверджено у виробничих умовах, а основні результати роботи впроваджено на ТЗОВ «ВІМ енергоконструкція»

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи виконано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачем запропоновано метод профілювання [1, 19] та вимірювання [2, 21] деталей гвинтових робочих органів, розроблено теоретичні [3, 6, 7, 11,] та технологічні [4, 5, 9] передумови формоутворення гвинтових заготовок, досліджено процес проточування [16, 17], проведено комплекс експериментальних досліджень [8], запропоновано технологічне спорядження процесу [12, 13, 18, 20] та способи виготовлення ГЕЗ [10, 14], та їх використання [15].

Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконано спільно з науковим керівником та, частково, із співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались й обговорювались: на науково-практичних конференціях Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя у 2012-2015рр.; на Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (ТНТУ, 2013р.); у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка (Харків, 2014р.); у Луцькому національному технічному університеті 2013-2014рр.; у Львівському національному аграрному університеті (Дубляни, 2014р.); Робота доповідалась й отримала позитивний відгук на розширеному засіданні науково-технічного семінару Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 2015р.).

Публікації. Результати наукових досліджень викладені у 21 друкованій праці (2 одноосібних), з яких – 11 статей у фахових виданнях, одна з яких входить до міжнародних наукометричних баз Argo та Index Copernicus, 7 деклараційних патентів на корисні моделі, 3 тези наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації – 205 сторінок, в тому числі: 65 рисунків, 9 таблиць, список використаних літературних джерел із 131 найменування та 3 додатків на 48 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації – 157 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, об'єкт, предмет дослідження та задачі, які розв'язуються в роботі. Окреслено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію про зв'язок роботи з науковими програмами, відомості щодо апробацій отриманих результатів, публікацій, де зазначено особистий внесок здобувача, структури та обсягу роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз та узагальнення відомих наукових напрацювань і проблемних питань технології виготовлення ГПЗ. Обґрунтовано доцільність проведення досліджень та перспективність використання деталей, одержаних на їх основі, які застосовують у різноманітних технологічних системах: в змішувачах, транспортерах, теплообмінниках, очисниках, затискних елементах технологічного спорядження, в нагрівальних елементах, в системах кріплення, для армування, для виготовлення розсіювачів освітлювальних приладів в електротехнічній промисловості тощо.

Дослідженням технологічних процесів виготовлення гвинтових заготовок займались А.Ю. Аверкієв, В.В. Васильків, Б.М. Гевко, В.Е. Гурвиц, Л.М. Данильченко, А.П. Драган, А.Є. Дячун, В.А. Єгоров, А.З. Журавльов, О.М. Лясота, О.Л. Ляшук, А.Я. Палюх, С.Ф. Пилипака, М.І. Пилипець, Д.Л. Радик, Р.М. Рогатинський, С.Е. Рокотян, А.Е. Церна, І.Я. Шифрін, Joekel Alfred, Langen Hans, Denner Peter, Herrmann Wolfgang, та ін.

Встановлено, що процес формоутворення еліпсного профілю гвинтових заготовок є малодослідженим, а технологічні можливості існуючих пристроїв не забезпечують такий процес. Для виготовлення таких заготовок потрібні додаткові як теоретичні так і експериментальні дослідження.

На основі проведеного аналізу визначено наукові підходи та напрямки досліджень в якості вихідних для вирішення поставлених в роботі задач.

У **другому розділі** розглянуто процес навивання стрічки на еліпсну оправу, розрахункова схема якого представлена на рис. 1. На схемі наведено наступні позначення: 1 – еліпсна оправу; 2 – притискний ролик; 3 – стрічка; 4 – гвинтовий еліпсний елемент; 5 – торцевий кулачок, форма якого відповідає еквідестанті еліпсної оправу 1; r – внутрішній радіус гнuttя; R_s – зовнішній радіус взаємодії гвинтового елемента відносно центра обертання оправу; a – половина більшої осі еліпса; b – половина меншої осі еліпса; B – ширина стрічки; θ – кутовий параметр, що знаходиться в межах $0 \leq \theta \leq 2\pi$ і визначає кут повороту еліпсної оправу; H – товщина стрічки; F_{T1} – сила тертя між роликом та стрічкою; F_{T2} – сила тертя між стрічкою та еліпсною оправою; γ – кут тиску оправу; N – поздовжня сила; F – рівнодіюча нормальних контактних напружень на стрічці; ω – кутова швидкість обертання еліпсної оправу з торцевим кулачком; ω_1 – кутова швидкість обертання притискного ролика; P – сила гнuttя притискним роликом; l – відстань між центрами оправу та притискного ролика; R_0 – відстань від центра обертання оправу до її поверхні.

В процесі навивання відбувається стиснення волокон стрічки на внутрішньому діаметрі і розтяг волокон стрічки на зовнішньому діаметрі еліпсної

гвинтової заготовки. Визначено момент згину стрічки в цих зонах, розглянувши процес деформації в гарячому та холодному стані.

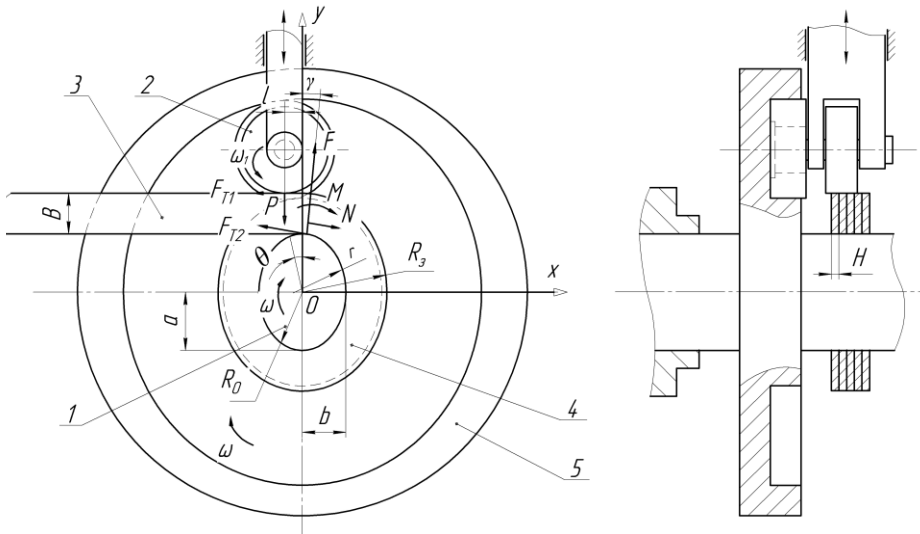


Рис. 1. Розрахункова схема процесу навивання стрічки на оправу

Особливістю отримання ГЕЗ способом навивання стрічки на еліпсну оправу є те, що радіуси кривизни, а відповідно і радіуси гнуття стрічки є змінними протягом одного оберту еліпсної оправы. Тому внутрішній і зовнішній радіуси гнуття заготовки визначали на основі рівняння радіуса кривизни еліпса:

$$r = a^2 b^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (1)$$

Відповідно зовнішній радіус R_3 гнуття стрічки можна визначити за формулою:

$$R_3 = r + \beta_y B, \quad (2)$$

де β_y - коефіцієнт усадки стрічки під час навивання, мм.

У випадку навивання стрічки на еліпсну оправу в холодному стані відбувається зміцнення матеріалу стрічки, і відповідно момент гнуття буде залежати від кута повороту еліпсної оправы. При чому найбільший момент гнуття виникає при куті повороту $\theta = 0, \pi$ радіан, найменший момент гнуття виникає при кутах повороту $\theta = 1/2\pi, 3/4\pi$ радіан

$$M = \beta H \left[\sigma_{TO} \frac{\beta_y^2 B^2}{4} + \Pi \left(\frac{2r^2 + 2r\beta_y B + \beta_y^2 B^2}{4} \cdot \ln \sqrt{1 + \frac{\beta_y B}{r}} - \frac{2r\beta_y B + \beta_y^2 B^2}{8} \right) \right], \quad (3)$$

де β – коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження, дорівнює 1,15; σ_{TO} – екстрапольована границя текучості матеріалу стрічкової заготовки, МПа; Π – лінійний модуль зміцнення матеріалу стрічки, МПа.

При навиванні стрічки в гарячому стані не відбувається зміцнення матеріалу і лінійний модуль зміцнення буде рівний нулю. Після скорочень рівнянь одержано формулу для визначення моменту гнуття стрічки в гарячому стані

$$M = \beta \sigma_s \frac{H \beta_y^2 B}{4}, \quad (4)$$

де σ_s – границя текучості матеріалу стрічкової заготовки, МПа.

На основі формули (4) бачимо, що на момент гнуття стрічки в гарячому стані не суттєво впливають радіуси кривизни еліпсної оправы, а отже він буде постійним протягом одного оберту оправы. В діапазоні ексцентриситету оправы $e = 0,45 - 0,52$.

Згідно розрахункової схеми на рис. 1 рівняння рівноваги частини стрічки, що піддається деформації записано наступним чином

$$P = F; N = (\mu_1 + \mu_2)P; P = \frac{M}{l + \mu_1(R_3 - 1) + \mu_2(\sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} - 1)}, \quad (5)$$

де μ_1 – коефіцієнт тертя між притискним роликком та стрічкою; μ_2 – коефіцієнт тертя між оправою та гвинтовим елементом.

Тут коефіцієнт тертя μ_1 між притискним роликком і профільною стрічкою є величиною приведеною і не відповідає безпосередньому значенню коефіцієнта тертя для контактуючих матеріалів. Момент, який необхідно прикласти для обертання оправи, залежить від конструктивних особливостей оправ і в загальному випадку визначається згідно рис. 1 за залежністю

$$M_0 = k_M P (l + \mu_1 \sqrt{(a + B)^2 \cos^2 \theta + (b + B)^2 \sin^2 \theta}), \quad (6)$$

де k_M – коефіцієнт, що враховує конструктивні виконання оправи.

Для розрахунку сили і моменту гнуття складені програми на ЕОМ. Результати розрахунків, проведених для початкової заготовки $B=15\text{мм}$, 20мм , 25мм ; $H=1\text{мм}$, $1,2\text{мм}$, $1,5\text{мм}$ та еліпсної оправи $a=50\text{мм}$; $b=40\text{мм}$ подані на рис. 2, 3, де наведені графіки залежності сили і моменту гнуття від кута повороту еліпсної оправи.

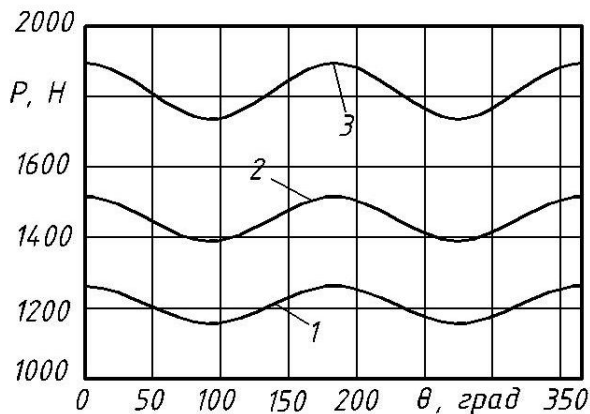


Рис. 2. Графіки залежності сили навивання від кута повороту оправи (Ст 3, $\sigma_b=440\text{МПа}$) $B=15\text{мм}$; $a=50\text{мм}$; $b=40\text{мм}$: 1 – $H=1\text{мм}$; 2 – $H=1,2\text{мм}$; 3 – $H=1,5\text{мм}$

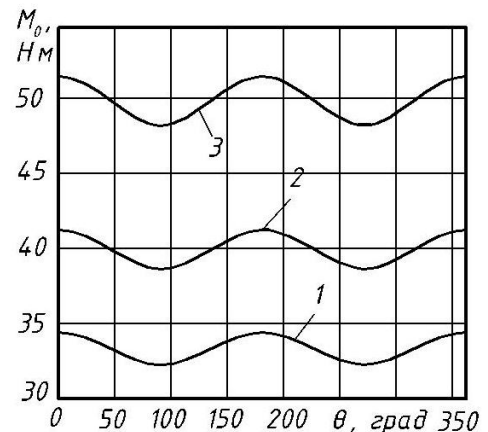


Рис. 3. Графіки залежності моменту від кута повороту оправи (Ст 3, $\sigma_b=440\text{МПа}$) $B=15\text{мм}$; $a=50\text{мм}$; $b=40\text{мм}$: 1 – $H=1\text{мм}$; 2 – $H=1,2\text{мм}$; 3 – $H=1,5\text{мм}$

З графічних залежностей рис. 2, 3 видно, що при товщині стрічки $H = 1\text{ мм}$, сила навивання стрічки знаходиться в межах $P = 1160 - 1270\text{ Н}$, а момент, який необхідно прикласти для обертання оправи $M_0 = 34 - 32,5\text{ Н·м}$, при $H=1,2\text{мм}$ відповідно $P = 1395 - 1515\text{ Н}$, а $M_0 = 38,5 - 41,5\text{ Н·м}$, при $H=1,5\text{мм}$ $P = 1720 - 1890\text{ Н}$, а $M_0 = 48 - 52\text{ Н·м}$. Зусилля і момент формоутворення набувають максимального значення в процесі формування заготовки на частині еліпсної оправи зі сторони великої піввісі.

Залежності сили і моменту навивання від товщини та висоти стрічки подано на рис. 4, 5.

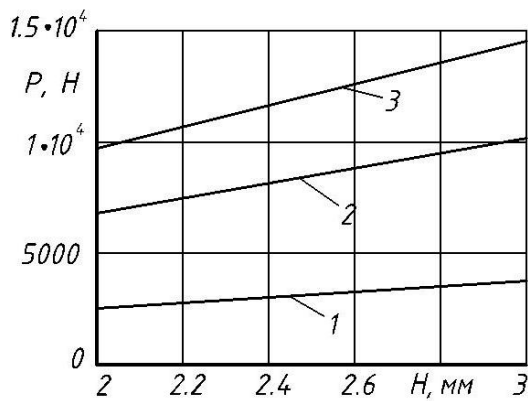


Рис. 4. Графіки залежності максимальної сили навивання від товщини стрічки (Ст 3, $\sigma_B=440\text{МПа}$) $a=50\text{мм}$; $b=40\text{мм}$: 1 – $B=15\text{мм}$; 2 – $B=25\text{мм}$; 3 – $B=30\text{мм}$

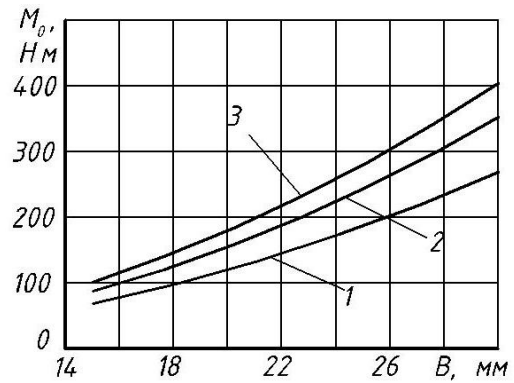


Рис. 5. Графіки залежності максимального моменту, від ширини стрічки (Ст 3, $\sigma_B=440\text{МПа}$) $a=50\text{мм}$; $b=40\text{мм}$: 1 – $H=2\text{мм}$; 2 – $H=2,5\text{мм}$; 3 – $H=3\text{мм}$

Із даних графіків видно, що із зростанням значень B і H сила і момент навивання зростають. Наведені вище залежності використані для проектування технологічного спорядження формоутворення гвинтових заготовок навиванням на еліпсну оправу. При цьому, для зменшення моменту обертання оправы, а отже, і зменшення необхідної потужності навивання ГЕЗ, потрібно звести до мінімуму коефіцієнт тертя μ_1 , наприклад, використовуючи мастила.

Запропоновано спосіб формоутворення еліптичних оправ. Вихідною заготовкою є товстостінна циліндрична труба ГОСТ 8732-78. Розглянуто отримувану даним способом форму пружної лінії трубчастої заготовки, а саме її перерізу у вигляді тонкого нерозрізного кільця. Початковий радіус заготовки R_T (рис. 6а). Деформуюче зусилля забезпечується двома взаємно врівноваженими радіальними силами Q . Для спрощення розрахунку розглядали четверту частину перерізу кільцевої заготовки (рис. 6б), причому $P_T = Q/2$. Довжина пружної лінії дорівнює $l_T = \pi R_T/2$.

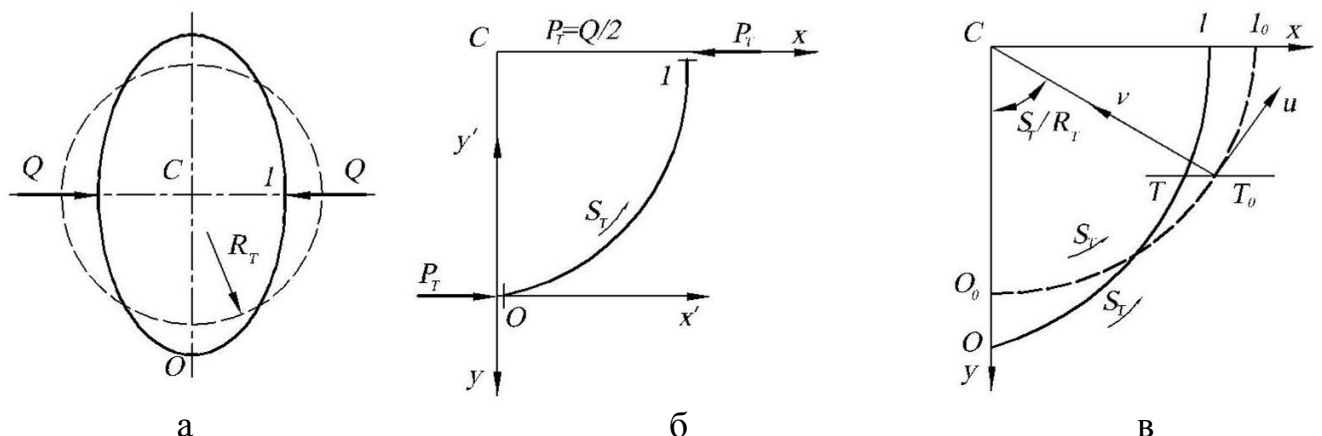


Рис. 6. Розрахункові схеми для визначення еліптичних параметрів деформованої заготовки: C – центр заготовки; O – точка перегину

Проведено дослідження методом еліптичних параметрів. Визначено момент згину у будь-якому перерізі заготовки

$$M_T = \omega_T Q R_T / (4\beta_T / \pi) - EJ / R_T, \quad (7)$$

де E – модуль пружності матеріалу труби; J – осьовий момент інерції площі поперечного перерізу труби; ω_T – моментний коефіцієнт подібності; β_T – коефіцієнт подібності.

Статична характеристика для гнutoго кільця описується залежністю $Q(q)$, де q – зміщення сили Q , причому

$$Q = 2(\beta_T 2/\pi)^2 (EJ/R_T^2), \quad (8)$$

Відповідно прогин v і зміщення u у довільній точці T , визначали наступним чином (рис. 6в)

$$v = R_T - y \cos S_T / R_T - x \sin S_T / R_T, \quad u = x \cos S_T / R_T - y \sin S_T / R_T, \quad (9)$$

де довжина дуги S_T пружної лінії при згині залишається незмінною, причому її відносна величина S_T/R_T відповідає значенню кутової координати точки T_0 .

Методом графічної побудови досліджено залежності деформуючого зусилля від товщини стінки труби, $Q = f(h_T)$. Виявлено, що при технологічному виконанні еліпсної оправи, шляхом деформування трубного прокату, спостерігається лінійне збільшення жорсткості вихідної конструкції, що пояснює причину зростання необхідного для формоутворення зусилля Q . Відповідно чим більша товщина стінки вихідної заготовки, тим суттєвіше зростання енергозатрат на деформування. Так для товщини стінки $h_T = 3$ мм при діаметрах $D = 32, 42, 50$ мм відбувається зростання необхідного для формоутворення зусилля від 1,2 до 1,35 рази. Запропонованим способом можна формувати еліпсні кожухи для двошнекових змішувачів.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що для навивання еліпсних гвинтових заготовок із заданим кроком необхідно на вершинах еліпсної оправи проточувати напрямні канавки. Для забезпечення якісного проточування канавок розроблено пристрій, використаний в процесі проведення експериментів. Встановлено, що в процесі проточування гвинтових канавок виникають динамічні коливання, які впливають на якість поверхневого шару канавок і точність їх розмірів. Коливання виникає як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. На основі вищесказаного досліджено динамічні навантаження на елементи системи пристрій–різець–заготовка та характер переміщення її складових. В роботі запропоновано динамічну модель процесу проточування (рис. 7), яка дозволила дослідити коливання системи та товщину зрізаного шару стружки і її вплив на зусилля точіння.

Прийнято, що пристрій для нарізання зовнішніх профільних гвинтових заготовок може здійснювати крутильні коливання. Записали диференціальні рівняння коливання без врахування опору середовища, використавши відомі рівняння Лагранжа другого роду. Остаточно повна система рівнянь задачі має вигляд

$$\begin{aligned} I\ddot{\varphi} + [k_{\kappa p} + R_p^2(C_1 + C_2)]\varphi - R_p(C_1x_1 + C_2x_2) &= 0; & m_1\ddot{y}_1 + C_1^p y_1 &= P_{y_1}; \\ m_1\ddot{x}_1 + C_1x_1 - R_pC_1\varphi &= P_{x_1}; & m_2\ddot{y}_2 + C_2^p y_2 &= P_{y_2}, \\ m_2\ddot{x}_2 + C_2x_2 - R_pC_2\varphi &= P_{x_2}; \end{aligned} \quad (10)$$

де R_p – радіус відносно осі обертання центрів мас різців; m_1, m_2 – маси різців; φ – кут повороту пристрою; I – момент інерції пристрою відносно осі обертання; P_{x_1} ,

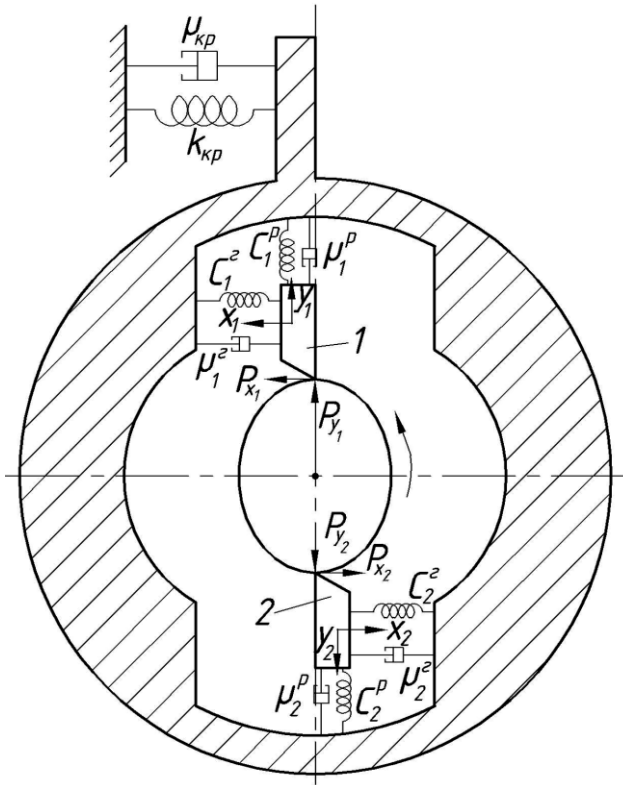


Рис. 7. Динамічна модель проточування зовнішніх гвинтових канавок на еліпсній заготовці

P_{y_1} – складові сил різання першого різця; P_{x_2} , P_{y_2} – складові сил різання другого різця.

На рис. 7 прийняті наступні позначення: 1 – перший різець; 2 – другий різець; x_1, y_1 – переміщення центра мас різця 1 в трансверсальному і радіальному напрямках; x_2, y_2 – переміщення центра мас різця 2 в трансверсальному і радіальному напрямках; C_1^e, C_2^e – жорсткості пружного закріплення різців в горизонтальному напрямку (приведені); C_1^p, C_2^p – жорсткості пружного закріплення різців в радіальному напрямку; μ_{kp} – коефіцієнт в'язкого опору на кручення; k_{kp} – жорсткість на кручення (приведена); μ_1^e, μ_2^e – коефіцієнт в'язкого опору різців в трансверсальному напрямку; μ_1^p, μ_2^p – коефіцієнт в'язкого опору різців в радіальному напрямку.

Якщо знехтувати членами в'язкого опору середовища і ввести позначення $k'_{kp} = k_{kp} + R_p(C_1 + C_2)$, то одержимо рівняння власних коливань консервативної системи

$$\begin{cases} I\ddot{\varphi} + k'_{kp} - R_p C_1 x_1 - R_p C_2 x_2 = 0; \\ m_1 \ddot{x}_1 + C_1 x_1 - R_p C_1 \varphi = 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 + C_2 x_2 - R_p C_2 \varphi = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Для спрощення обчислень позначено:

$$Z_1 = \varphi; Z_2 = x_1; Z_3 = x_2; a_{11} = I; C_{11} = k'_{kp}; C_{12} = -R_p C_1; C_{13} = -R_p C_2; a_{22} = m_1; C_{22} = C_1; C_{21} = -R_p C_1; a_{33} = m_2; C_{33} = C_2; C_{31} = -R_p C_2.$$

Тоді система (11) отримає вигляд

$$\begin{cases} a_{11} \ddot{Z}_1 + a_{11} Z_1 + C_{12} Z_2 + C_{13} Z_3 = 0, \\ a_{22} \ddot{Z}_2 + C_{21} Z_1 + C_{22} Z_2 = 0, \\ a_{33} \ddot{Z}_3 + C_{31} Z_1 + C_{33} Z_3 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Часткові розв'язки цих рівнянь шукаємо у вигляді

$$Z_j = A_j \sin(\omega' \tau + \beta) = \mu_j A_1 \sin(\omega' \tau + \beta'), \quad (13)$$

де $\mu_j = \frac{A_j}{A_1}$, $j = 1, 2, 3$; β' – початкова фаза; τ – час; ω' – частота коливання.

Так, як рівняння (10) лінійні, то загальний розв'язок цих рівнянь отримали шляхом сумування відповідних часткових розв'язків.

$$\begin{aligned} q_1 &= A_1^{(1)} \sin(\omega'_1 \tau + \beta'_1) + A_1^{(2)} \sin(\omega'_2 \tau + \beta'_2) + A_1^{(3)} \sin(\omega'_3 \tau + \beta'_3), \\ q_2 &= \mu_2^{(1)} A_1^{(1)} \sin(\omega'_1 \tau + \beta'_1) + \mu_2^{(2)} A_1^{(2)} \sin(\omega'_2 \tau + \beta'_2) + \mu_2^{(3)} A_1^{(3)} \sin(\omega'_3 \tau + \beta'_3), \\ q_3 &= \mu_3^{(1)} A_1^{(1)} \sin(\omega'_1 \tau + \beta'_1) + \mu_3^{(2)} A_1^{(2)} \sin(\omega'_2 \tau + \beta'_2) + \mu_3^{(3)} A_1^{(3)} \sin(\omega'_3 \tau + \beta'_3). \end{aligned} \quad (14)$$

Невідомі $A_1^{(j)}$ і β'_j ($j=1, 2, 3$) визначаються з початкових умов.

Знаходження частот вимушених коливань системи.

Колівання різців в радіальному напрямку не залежать від коливань в трансверсальному напрямку та коливань пристрою для їх закріплення і описуються рівняннями:

$$\ddot{y}_i + 2n_i \dot{y}_i + k_i^2 y_i = P_{y_i} / m_i, \quad i=1,2, \quad (15)$$

де позначено $2n_i = \frac{\mu_i^P}{m_i}$, $k_i^2 = \frac{C_i^P}{m_i}$.

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння (15)

$$\tilde{y}_i = \frac{e^{-n_i \tau}}{m_i k_{1i}} \left[\sin k_{1i} \tau \int_0^\tau P_{y_i} e^{n_i \tau} \cos k_{1i} \tau d\tau - \cos k_{1i} \tau \int_0^\tau P_{y_i} e^{n_i \tau} \sin k_{1i} \tau d\tau \right], \quad (16)$$

а остаточно загальний його розв'язок прийме вигляд

$$y_i = \left\{ \left[C_{i1} - \frac{1}{m_i k_{1i}} \int_0^\tau P_{y_i} e^{n_i \tau} \sin k_{1i} \tau d\tau \right] \cos k_{1i} \tau + \left[C_{i2} + \frac{1}{m_i k_{1i}} \int_0^\tau P_{y_i} e^{n_i \tau} \cos k_{1i} \tau d\tau \right] \sin k_{1i} \tau \right\} e^{-n_i \tau}. \quad (17)$$

Постійні інтегрування знайдено з початкових умов. Якщо, наприклад, при $\tau=0$ $y_i=0$ і $\dot{y}_i=0$, то $C_{i1}=C_{i2}=0$ і розв'язок описується лише вимушеними коливаннями. Крім того, загальний розв'язок однорідного рівняння з ростом часу швидко згасає і тоді розглянуто лише вимушені коливання (16).

Таким чином частота згасаючих коливань визначається за формулою

$$k_{1i} = \sqrt{k_i^2 - n_i^2}, \quad i=1, 2. \quad (18)$$

Період згасаючих коливань

$$T_i = 2\pi / k_{1i} = 2\pi / \sqrt{k_i^2 - n_i^2}. \quad (19)$$

Так, як різці однакові і однакові умови закріплення їх в пристрої, то $k_{11}=k_{12}=k_1^* = \sqrt{k^2 - n^2}$; $T_1=T_2=T^* = 2\pi / \sqrt{k^2 - n^2}$.

Відомо, що складові сили різання залежно від глибини різання t можна представити у вигляді

$$P_x = A_x t^{x_p}, \quad P_y = A_y t^{y_p}, \quad (20)$$

де A_x , A_y , x_p , y_p – коефіцієнти, які залежать від матеріалу, геометрії інструменту, подачі, швидкості різання.

Товщина зрізуваного шару на протязі часу $\frac{\pi}{\omega'} + \tau'_0 \leq \tau \leq \frac{\pi}{\omega'} + \tau_0$ визначається за

$$\text{формулою } t(\tau) = a \left[\frac{b}{\sqrt{a^2 - (a^2 - b^2) \sin^2(\omega' \tau)}} - \alpha_2 \right]. \quad (21)$$

Таким чином згідно схеми врізання різців (рис. 8) будь-яку із складових сил різання схематично можна зобразити у вигляді графіка на рис. 9.

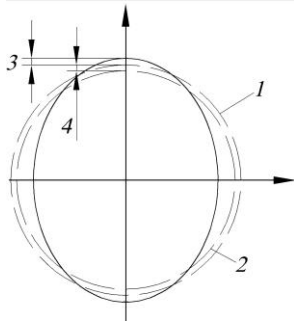


Рис. 8. Схема врізання різців: 1 – траєкторія різця 1; 2 – траєкторія різця 2; 3 – шар, що зрізує різець 1; 4 – шар, що зрізує різець 2

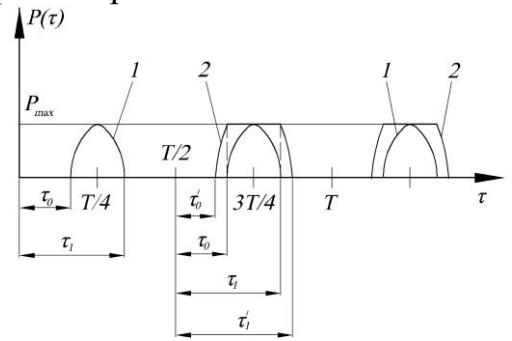
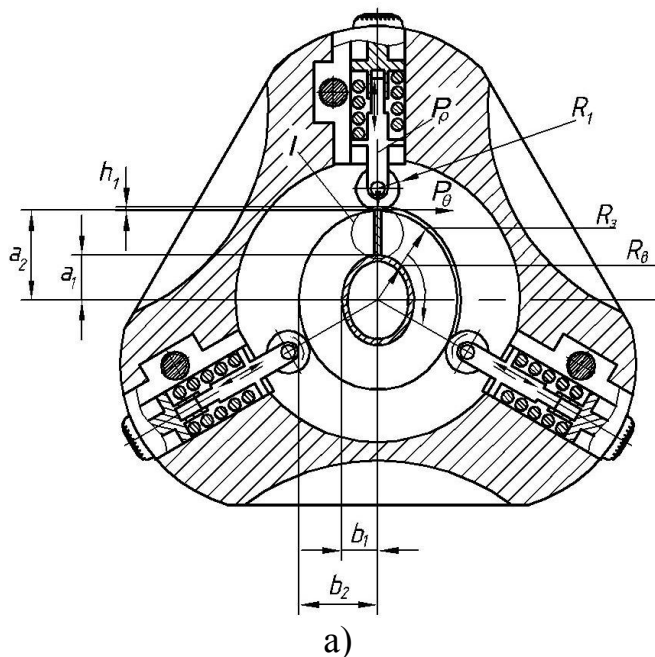


Рис. 9. Схематичне зображення складових сил різання: 1 – на першому різці; 2 – на другому різці



а)
Вид I

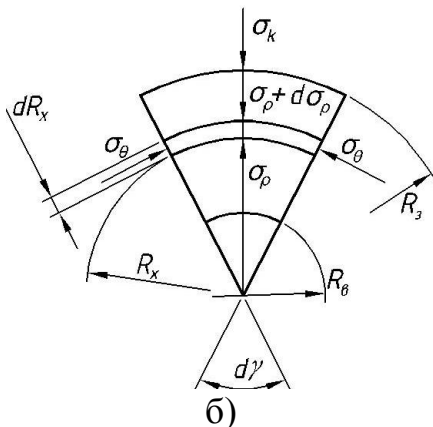


Рис. 10. Розрахункова схема для визначення зусилля деформації заготовки шнека:

а) схема взаємодії шнека із роликом;
б) напружений стан елементарного сектору

Відомо, що в процесі роботи гвинтових робочих органів найбільшого зношення зазнає зовнішня крайка спіралі. Пропонується зміцнення зовнішньої крайки гвинтової поверхні методом обкочування. Розроблена математична модель процесу зміцнювання зовнішньої крайки еліпсного шнека, яка дозволила визначити тангенціальне та радіальне зусилля деформації і крутильний момент, що необхідно прикласти для обертання шнека.

Для визначення зусилля деформації заготовки шнека при обкочуванні за зовнішнім діаметром, розглянемо розрахункову схему (рис 10), на якій прийнято позначення: $d\gamma$ – кут в плані; σ_ρ – радіальні напруження; σ_θ – тангенціальні напруження; R_1 – радіус обкатного ролика; h_1 – величина деформації матеріалу шнека в радіальному напрямку; R_3 – зовнішній радіус еліпсного шнека; R_6 – внутрішній радіус еліпсного шнека; a_1 – половина більшої осі еліпсної оправы; a_2 – половина більшої осі еліпсного шнека; b_1 – половина меншої осі еліпсної оправы; b_2 – половина меншої осі еліпсного шнека; σ_k – контактні напруження;

P_θ – тангенціальне зусилля деформації; P_ρ – радіальне зусилля деформації.

Під час деформації зовнішньої крайки шнека має місце вісесиметрична деформація, що дозволяє визначити напружений стан в місці деформації розглядом напруженого стану елементарного сектора (рис. 10б) з кутом в плані $d\gamma$. При цьому дотичні напруження дорівнюють нулю, а радіальні напруження σ_ρ і тангенціальні напруження σ_θ є головними.

Тангенціальне зусилля деформації визначено за формулою:

$$P_\theta = \left(\beta \sigma_s \ln \frac{R_3}{R_B} + \sigma_k \right) \arccos \left(\frac{R_1 - h_1}{R_1} \right) R_1 \sin \left(\frac{R_1 - h_1}{2R_1} \right) S_B \sqrt{\frac{R_B}{R_3}}, \quad (22)$$

де S_B – товщина витка шнека на внутрішньому діаметрі; а внутрішній R_B і зовнішній R_3 радіуси еліпсного шнека згідно рис. 10а) визначено за формулами:

$$R_B = a_1^2 b_1^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{a_1^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b_1^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad R_3 = a_2^2 b_2^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{a_2^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b_2^2} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Радіальне зусилля деформації визначено за формулою:

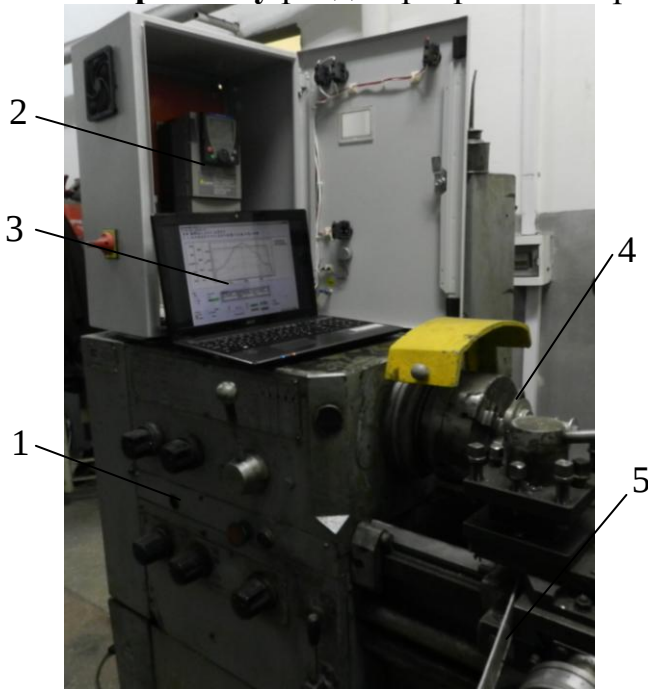
$$P_\rho = \left(\beta \sigma_s \ln \frac{R_3}{R_B} + \sigma_k \right) \arccos \left(\frac{R_1 - h_1}{R_1} \right) R_1 S_B \sqrt{\frac{R_B}{R_3}}. \quad (23)$$

Крутильний момент для обертання шнека визначаємо наступним чином:

$$M_K = \sum_{i=1}^j \left(\left(\beta \sigma_s \ln \frac{R_{3i}}{R_{Bi}} + \sigma_k \right) \arccos \left(\frac{R_1 - h_1}{R_1} \right) R_1 R_{3i} \sin \left(\frac{R_1 - h_1}{2R_1} \right) S_B \sqrt{\frac{R_{Bi}}{R_{3i}}} \right), \quad (24)$$

де j – кількість одночасно працюючих роликів; R_{3i} , R_{Bi} – відповідно зовнішній і внутрішній радіуси для кожного із роликів.

У третьому розділі розроблено програму та методику експериментальних



досліджень формоутворення еліпсних гвинтових заготовок та проточування зовнішніх профільних гвинтових канавок. Дослідження проведено на експериментальній установці (рис. 11) яка включає токарно-гвинторізний верстат 16Е16КП – 1; Altivar – 2; ПК – 3; пристрій для навивання еліпсних гвинтових елементів із заданим кроком (рис. 13) – 4; стрічкову заготовку – 5. Процес проточування канавок на еліпсній оправі досліджено, використовуючи розроблений пристрій для нарізання зовнішніх профільних гвинтових канавок (рис. 12).

Рис. 11. Загальний вигляд дослідної установки

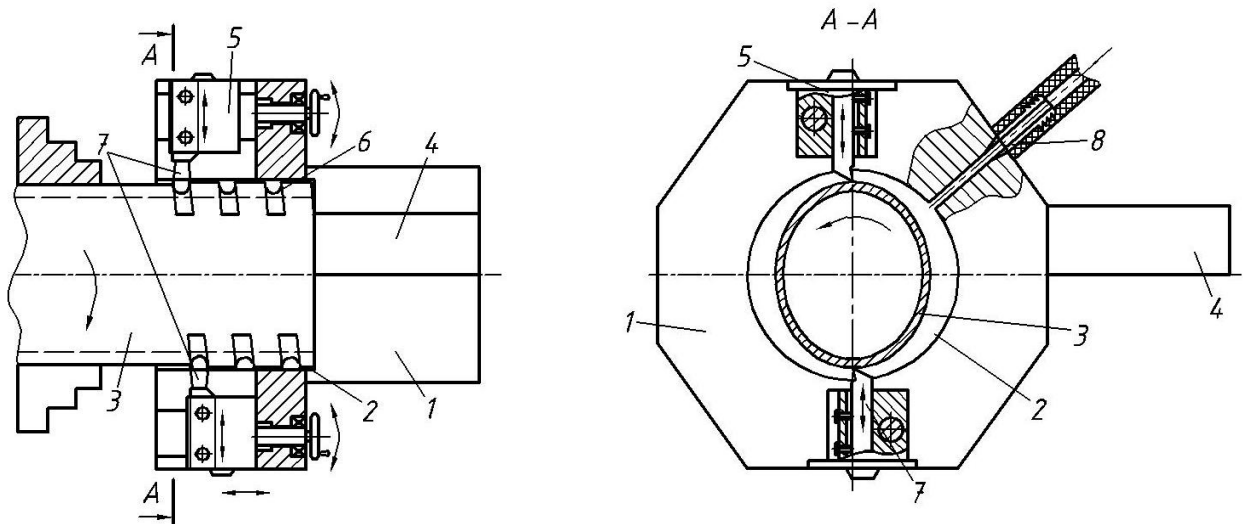


Рис. 12. Схема пристрою для нарізання зовнішніх профільних гвинтових канавок: 1 – корпус; 2 – наскрізний отвір; 3 – еліпсна оправа; 4 – державка; 5 – різцетримач; 6 – гвинтова канавка; 7 – різальні інструменти; 8 – штуцер для підводу МОР

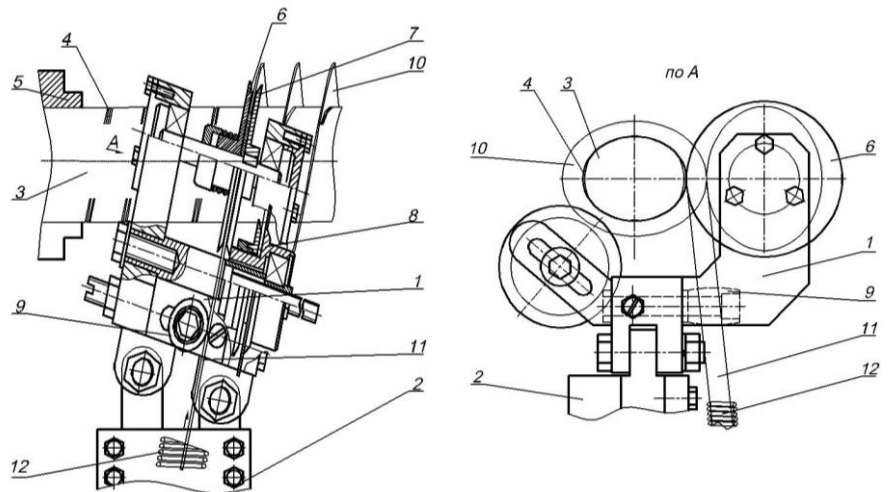
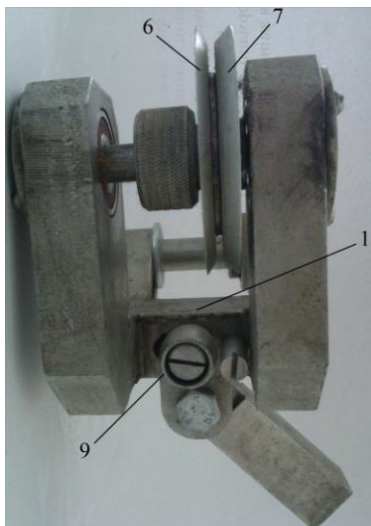


Рис. 13. Пристрій для навивання гвинтових заготовок та його загальний вигляд: 1 – U-подібний кронштейн; 2 – різцетримачем токарного верстату; 3 – еліпсна оправа; 4 – гвинтова канавка; 5 – патрон токарного верстату; 6 – направляючий шків; 7 – затискний диск; 8 – направляючий ролик; 9 – подаючий ролик; 10 – навитий виток заготовки; 11 – стрічкова заготовка; 12 – індуктор

У четвертому розділі наведені графоаналітичні результати експериментальних досліджень сили різання при проточуванні зовнішніх прямокутних гвинтових канавок та сили гнуття при навиванні стрічки на еліпсну оправу.

Отримано рівняння регресії для визначення впливу величини подачі S , глибини різання t та швидкості різання V на величину сили різання P_p у заготовка із сталі Ст3 та алюмінієвого сплаву Д16:

$$P_{p(S,t,V)}^{Ст3} = -313,68 + 3969,5S + 261,05t - 23,43V + 1065tS + 13,65tV - 3500S^2 - 132t^2 - 0,17V^2, \quad (25)$$

$$P_{p(S,t,V)}^{Д16} = 52,75 + 164,75S + 19,4t - 0,99V + 202,5tS. \quad (26)$$

Встановлено, що домінуючим фактором, який впливає на величину сили

різання є подача S , а найменш впливовим є швидкість різання V , однак і глибина різання t також суттєво впливає на силові параметри процесу точіння. Факторне поле визначалось таким діапазоном зміни параметрів: $0,3 \leq S \leq 0,5$ (мм); $2 \leq t \leq 3$ (мм); $25 \leq V \leq 45$ (м/хв).

Отримано рівняння регресії для визначення впливу товщини стрічки H , ширини стрічки B та половини меншої осі еліпса b на величину сили гнуття притискним роликком P при навиванні стрічки із сталі Ст3, 08кп та алюмінієвого сплаву Д16 відповідно:

$$P_{(H,B,b)}^{Ст3} = 2496,2 - 1468,15H - 366,09B + 67,23b + 228,06HB - 25,08Hb - 4,65Bb + 4,16H^2 + 11,68B^2 + 0,56b^2, \quad (27)$$

$$P_{(H,B,b)}^{08кп} = 1522,38 - 1025,54H - 274,38B + 60,08b + 175,59HB - 20,92Hb - 3,73Bb + H^2 + 9,02B^2 + 0,42b^2, \quad (28)$$

$$P_{(H,B,b)}^{Д16} = 3087,4 - 1773,9H - 431,27B + 73,72b + 269,34HB - 29,25Hb - 5,54Bb + 8,64H^2 + 13,8B^2 + 0,75b^2. \quad (29)$$

Встановлено, що переважаючі фактором, який впливає на величину сили гнуття притискним роликком є ширини стрічки B , а найменш впливовим є половини меншої осі еліпса b , однак і товщини стрічки H також суттєво впливає на силові параметри процесу навивання. Факторне поле визначено таким діапазоном зміни параметрів: $2 \leq H \leq 3$ (мм); $16 \leq B \leq 30$ (мм); $32 \leq b \leq 42$ (мм) при половині більшої осі еліпса $a = 45$ мм.

У п'ятому розділі представлено комп'ютерну модель процесу навивання стрічки на еліпсну оправу (рис. 14), яка дала змогу визначити мінімальний радіус гнуття та побудувати графічну залежність напружень від радіуса кривизни (рис. 15).

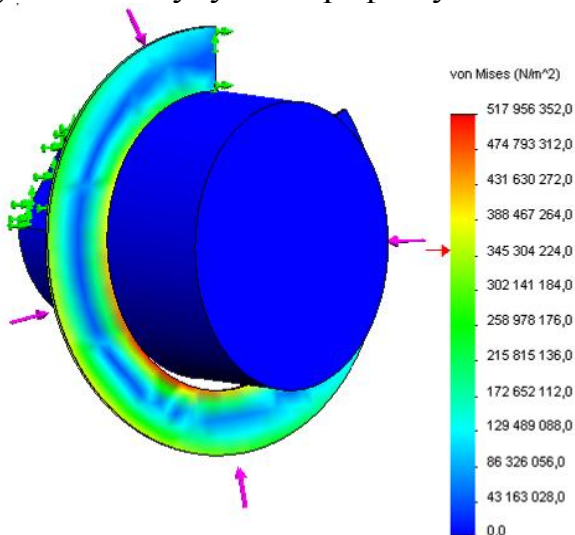


Рис. 14. Напруження, що виникають в матеріалі стрічкової заготовки під дією прикладеного зусилля

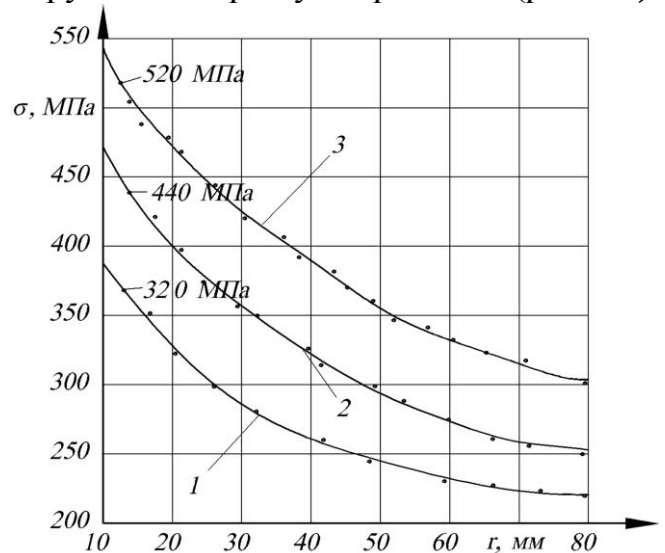


Рис. 15. Графічна залежність зміни напружень, що виникають в матеріалі стрічкової заготовки від радіуса кривизни гнуття: 1 – Ст 3, $\sigma_B = 440$ МПа; 2 – сталь 08кп, $\sigma_B = 340$ МПа; 3 – алюмінієвий сплав Д16, $\sigma_B = 520$ МПа

Комп'ютерна модель (рис. 14) підтвердила, що максимальні напруження виникають на більшій осі еліпсної оправу, а з графічної залежності (рис. 15) видно, що із збільшенням радіуса гнуття стрічки напруження, що виникають в її матеріалі зменшуються, а при значенні радіуса $r=16\text{мм}$ набувають недопустимо великих значень, що призводить до руйнування матеріалу. Отже, доцільно вибирати еліпсну оправу з мінімальним радіусом кривизни не менше 20 мм.

Запропоновано ряд конструкцій пристроїв для розширення технологічних можливостей: а) контрольний пристрій «Шнекомір» [21] для контролю параметрів: зовнішній діаметр у діапазоні 60-200 мм, крок 20-150 мм, шорсткість; б) лунет для відрізання профільних заготовок [17], який дозволяє відрізати довгомірні профільні заготовки із заданою точністю; в) пристрій для формування і зміцнення зовнішнього профілю гвинтових робочих органів, який дозволяє підвищити зносостійкість шнеків. Спосіб ротаційного профілювання еліптичних пустотілих заготовок [19], який надає можливість отримувати еліптичні заготовки з трубного прокату.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі розроблення та практичної реалізації раціональних ТП виготовлення ГЕЗ, які включають формоутворення навиванням на еліпсну оправу, проточування профільних гвинтових канавок і обкочування зовнішньої крайки гвинтових робочих органів, обґрунтування параметрів технологічного спорядження необхідного для визначених операцій створення ГЕЗ. Ця задача вирішена на основі досліджень силових параметрів формоутворення та динаміки проточування профільних гвинтових канавок, що дає можливість розробляти технологію і виготовляти нові робочі органи змішувачів сипучих матеріалів.

1. Отримано аналітичні залежності, які описують зв'язок геометричних параметрів гнуття: внутрішнього r і зовнішнього R_z радіусів гнуття з осями еліпса та їх вплив на енергосилові показники процесу формоутворення, що дозволило виробити рекомендації щодо зменшення енергозатрат. Встановлено що при формуванні заготовок зі стрічки (Ст 3, $\sigma_b=440\text{МПа}$) $B=15\text{мм}$; $H=2\text{мм}$ на оправу $a=50\text{мм}$; $b=40\text{мм}$: сила гнуття знаходиться в межах $P=2500-2720\text{Н}$, а момент $M_0=85-88\text{Нм}$. Зусилля і момент формоутворення набувають максимального значення в процесі формування заготовки на частині еліпсної оправу зі сторони великої піввісі і відповідно спадає на малій піввісі еліпса.

2. Досліджено функціональні залежності, що виявляють зв'язки між енергосиловими параметрами виготовлення та необхідними конструктивними параметрами технологічного спорядження, встановлено, що стабільний процес формоутворення еліптичних гвинтових заготовок можливий при ексцентриситеті еліпсної оправу в межах 0,5-0,8. При ексцентриситеті меншим 0,4 проходить розрив зовнішньої крайки заготовки через недопустиме зменшення радіуса навивання.

3. Розроблено динамічну модель проточування профільних гвинтових канавок, на основі динамічних характеристик технологічної системи виведені залежності для визначення власних і вимушених коливань системи, досліджено процес стружкоутворення, що дозволило оцінити зміну зусиль різання в процесі

проточування канавок на еліпсній оправі. Допустима подача $S = 0,4$ мм, при глибині $t = 2,5$ мм.

4. Досліджено процес обкочування зовнішньої крайки гвинтових робочих органів в холодному і гарячому станах, виведено розрахункові залежності для визначення силових параметрів процесу, з метою підвищення їх експлуатаційної надійності і довговічності, встановлено, що вирішальним фактором на зміну напруження згину є саме діаметральні параметри заготовки. Виведені також аналітичні залежності для визначення крутного моменту обертання шнека при його обтискуванні в залежно від радіуса ролика: $R_1 = 50, 60$ і 70 мм, при цьому момент змінюється в межах $4 \cdot 10^5$ до $8 \cdot 10^5$ Нмм.

5. Розроблено математичну модель профілювання пустотілих еліпсних заготовок, що дає змогу визначити їх основні параметри. Для однакових значень товщини стінки при $D=100$ мм значення напруження згину перевищують аналогічні при $D=180$ мм, більше ніж у 1,8 рази.

6. На основі теоретичних та експериментальних досліджень процесів формоутворення навивних заготовок вперше розроблено методику розрахунку та проектування технологічних процесів формоутворення еліпсних гвинтових заготовок, конструкцій конкурентоздатного устаткування й спорядження з урахуванням технологічних умов формоутворення та забезпечення експлуатаційних вимог, які забезпечують економію матеріально-енергетичних ресурсів на 12–17%.

7. Для проведення експериментальних досліджень параметрів формоутворення гвинтових еліпсних заготовок створено експериментально-дослідну установку на базі токарно-гвинторізного верстата 16E16КП оснащеного пристроєм для навивання еліпсних гвинтових елементів, Altivar для зняття результатів і ПК для оброблення результатів. Проведено комплекс експериментальних досліджень впливу трьох основних факторів: товщини стрічки H , ширини стрічки B та половини меншої осі еліпса b на сили гнуття притискним роликом. Встановлено, що на варіацію енергетичних факторів істотний вплив мають ширина B стрічки – 43%, товщина H стрічки – 32%, і лише 12% половина меншої осі еліпса b .

8. Виведено регресійні залежності для визначення сили навивання на еліпсну оправу залежно від товщини H і ширини B стрічки та половини меншої осі еліпса b заготовки для різних матеріалів. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність теоретичних напрацювань.

9. Отримано наукові результати підтверджені експериментальними даними (максимальне розходження між результатами теоретичного аналізу і експериментів не перевищує 17%). Розроблено ресурсощадні технологічні процеси формоутворення еліпсних гвинтових заготовок. Створені конкурентоздатні пристрої для формоутворення еліпсних заготовок, інструмент для контролю параметрів: зовнішній діаметр у діапазоні 60-200 мм, крок 20-150 мм з точністю 0,1 мм, та шорсткість виготовлених спіралей, і пристрій для проточування зовнішніх профільних гвинтових канавок. Розроблені пристрої пройшли дослідно-промислову апробацію (підтверджено 2 актами) та впроваджені у виробництво на підприємствах України з річним економічним ефектом 15,4 тис.грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кучвара І. М. Технологічні передумови профілювання кожухів гвинтових конвеєрів / Б. М. Гевко, Р. В. Комар, І. М. Кучвара // Наукові нотатки: міжвуз. зб. наук. праць. – Луцьк, 2013. – Вип. 43. – С. 65-70. *(Автором запропоновано та розроблено метод профілювання еліпсних пустотілих заготовок)*.
2. Кучвара І. М. Морфологічний синтез пристроїв для заміру конструктивних параметрів шнека / А. Є. Дячун, Ю. М. Тарасюк, В. М. Клендій, П. В. Босюк, І. М. Кучвара // Наукові нотатки: міжвуз. зб. наук. праць. – Луцьк, 2014. – Вип. 44. – С. 98-103. *(Автором проведено структурний синтез пристроїв для контролю конструктивних параметрів шнека)*.
3. Кучвара І. М. Технологічні передумови формування навивних гвинтових заготовок / М. І. Пилипець, М. Г. Левкович, І. М. Кучвара // Наукові нотатки: міжвуз. зб. наук. праць. – Луцьк, 2014. – Вип. 44. – С. 208-212. *(Автором розроблено і виготовлено пристрій для навивання гвинтових заготовок на оправу)*.
4. Кучвара І. М. Технологічність конструкцій механізмів з гвинтовими робочими органами / Б. М. Гевко, А. Є. Дячун, І. М. Кучвара, В. М. Клендій // Сільськогосподарські машини: міжвуз. зб. наук. праць. – Луцьк, 2013. – Вип. 26. – С. 13-19. *(Автором визначено основні показники технологічності та конструктивної складності виконання гвинтових деталей)*.
5. Кучвара І. М. Синтез технологічного спорядження для навивання гвинтових заготовок / Б. М. Гевко, О. Л. Ляшук, І. М. Кучвара, І. І. Брошак // Наукові нотатки: міжвуз. зб. наук. праць. – Луцьк, 2013. – Вип. 40. – С. 37-44. *(Автором розроблено морфологічна модель пристроїв для навивання гвинтових заготовок з покращеними експлуатаційними характеристиками і вибрано 5 конструкцій)*.
6. Кучвара І. М. Підвищення експлуатаційної надійності гвинтових робочих органів / А. Є. Дячун, І. М. Кучвара // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2014. – Вип. 151. – С. 206-212. *(Автором досліджено напружено-деформований стан поверхні гвинтового робочого органу в процесі його зміцнення, що дозволило встановити силові параметри процесу)*.
7. Кучвара І. М. Формування ремонтних шнекових заготовок гвинтових робочих органів / І. Б. Гевко, В. З. Гудь, І. М. Кучвара // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2014. – Вип. 146. – С. 164-167. *(Автором приведені аналітичні залежності для визначення силових і конструктивних параметрів пристрою)*.
8. Кучвара І. М. Результати експериментальних досліджень з визначення впливу технологічних факторів на конструктивні параметри гвинтових заготовок / Б. М. Гевко, О. Л. Ляшук, І. Б. Гевко, І. М. Кучвара // Сільськогосподарські машини: міжвуз. зб. наук. праць. – Луцьк, 2013. – Вип. 24. – С. 53-60. *(Автором уточнені аналітичні залежності для визначення зовнішніх і внутрішніх діаметрів гвинтових заготовок від величини кроку гвинтового елемента в процесі їх формоутворення)*.
9. Кучвара І. М. Структурний синтез гвинтових робочих органів механізмів машин / О. Л. Ляшук, Р. О. Любачівський, І. М. Кучвара // Вісник Національного

технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Серія машинобудування. – Київ, 2013. – №2 (68) – С. 25-31. *(Автором проведено синтез гвинтових робочих органів методом морфологічного аналізу і встановлено їх основні морфологічні ознаки).*

10. Кучвара І. М. Технологічні передумови виготовлення профільних гвинтових робочих органів сільськогосподарських машин / І. М. Кучвара // Сільськогосподарські машини: міжвуз. зб. наук. праць. – Луцьк, 2013. – Вип. 24. – С. 40-52.

11. Кучвара И. Н. Исследование силовых параметров формообразования профильных винтовых элементов / И. Б. Гевко, И. Н. Кучвара, А. Е. Дячун, А. Б. Гупка // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Lublin, 2015. – Vol. 17, no 7. – P. 111-116. *(Автором виведені аналітичні залежності для визначення силових параметрів процесу навивання і конструктивних параметрів технологічного обладнання. Входить у наукометричні бази: Argo, та Index Copernicus).*

12. Кучвара І. М. Пристрій для нарізання зовнішніх гвинтових профільних канавок / І. М. Кучвара // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2013 р. : тези допов. – Тернопіль : ТНТУ, 2013. – С. 106.

13. Кучвара І.М. Пристрій для виготовлення гвинтових еліпсних заготовок / І. М. Кучвара, І. Г. Ткаченко, І. Б. Гевко // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2013 р. : тези допов. – Тернопіль : ТНТУ, 2013. – С. 147-148. *(Автором розроблено технологічний процес виготовлення еліпсних заготовок).*

14. Кучвара І. М. Підвищення ефективності виготовлення профільних гвинтових заготовок тіл обертання / І. М. Кучвара, М. І. Пилипець // Збірник тез доповідей III наукової конференції МТФ «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті», 21 травня 2015 р. : тези допов. – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 17-18. *(Автором виведені аналітичні залежності для визначення силових параметрів процесу навивання)*

15. Пат. 83798 Україна, МПК (2013.01) В 01 F 7/00. Гвинтовий двошнековий змішувач / Пилипець М.І., Дячун А.Є., Кучвара І.М., Любачівський Р.О., Гевко І.Б.; заявники та патентовласники Пилипець М.І., Дячун А.Є., Кучвара І.М., Любачівський Р.О., Гевко І.Б. – № у 2013 05436; заявл. 26.04.13; опубл. 25.09.13, Бюл. № 18. *(Частка всіх авторів однакова)*

16. Пат. 83805 Україна, МПК (2013.01) В 23 В 5/00. Спосіб одночасного проточування довгомірних деталей складних профілів / Кучвара І.М., Пилипець М.І., Дзюра В.О., Гевко І.Б.; заявники та патентовласники Кучвара І.М., Пилипець М.І., Дзюра В.О., Гевко І.Б. – № у 2013 05520; заявл. 29.04.13, опубл. 25.09.13, Бюл. № 18. *(Частка всіх авторів однакова)*

17. Пат. 98902 Україна, МПК (2015.01) В 23 D 15/00. Люнет для відрізання профільних заготовок / Кучвара І.М., Гевко І.Б., Білик С.Г., Диня В.І., Фльонц О.В.; заявники та патентовласники Кучвара І.М., Гевко І.Б., Білик С.Г., Диня В.І., Фльонц О.В. – № у 2014 12902; заявл. 02.12.14, опубл. 12.05.15, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова)*

18. Пат. 98903 Україна, МПК (2006.01) В 21 D 11/06. Пристрій для навивання еліпсних гвинтових заготовок / Кучвара І.М., Гудь В.З., Дячун А.Є., Саранчук Л.І., Гевко І.Б.; заявники та патентовласники Кучвара І.М., Гудь В.З., Дячун А.Є., Саранчук Л.І., Гевко І.Б. – № у 2014 12903; заявл. 02.12.14, опубл. 12.05.15, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова)*

19. Пат. 81484 Україна, МПК (2006.01) В 23 В 5/48. Спосіб ротаційного профілювання еліптичних кожухів гвинтових конвєсєрів / Кучвара І.М., Комар Р.В.; заявники та патентовласники Кучвара І.М., Комар Р.В. – № у 2013 02359; заявл. 25.02.13, опубл. 25.06.13, Бюл. № 12. *(Частка всіх авторів однакова)*

20. Пат. 99015 Україна, МПК (2006.01) В 21 D 11/06. Універсальний пристрій для навивання профільних гвинтових заготовок / Кучвара І.М., Гудь В.З., Дячун А.Є., Гевко І.Б.; заявники та патентовласники Кучвара І.М., Гудь В.З., Дячун А.Є., Гевко І.Б. – № у 2014 13725; заявл. 22.12.14, опубл. 12.05.15, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова)*

21. Пат. 98974 Україна, МПК (2006.01) G 01 В 3/20. Шнекомір / Кучвара І.М., Дячун А.Є., Тарасюк Ю.М., Навроцька Т.Д., Клендій В.М.; заявники та патентовласники Кучвара І.М., Дячун А.Є., Тарасюк Ю.М., Навроцька Т.Д., Клендій В.М. – № у 2014 13360; заявл. 12.12.14, опубл. 12.05.15, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова)*

АНОТАЦІЯ

Кучвара І.М. Технологічне забезпечення виготовлення деталей еліпсних гвинтових робочих органів машин. – 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, 2016.

У дисертаційній роботі виконано теоретичні та експериментальні дослідження технологічного процесу виготовлення еліпсних гвинтових робочих органів. Запропоновано спосіб формоутворення гвинтових еліпсних заготовок на еліпсну оправу з відповідним технологічним спорядженням, що піддається швидкому переналагодженню на широкий спектр розмірів залежно від потреб ринку. Виведено аналітичні залежності для визначення силових параметрів процесів формоутворення профільних гвинтових заготовок і конструктивних параметрів необхідного технологічного спорядження.

Досліджено процес проточування гвинтових канавок на еліпсній оправі для формоутворення еліпсної гвинтової спіралі з заданим кроком шляхом розроблення динамічної моделі процесу проточування зовнішніх гвинтових канавок.

Розроблено математичну модель процесу зміцнення зовнішньої крайки шнека обкочуванням, за якою можна визначити конструктивні параметри пристрою та технологічні параметри процесу зовнішнього обкочування зі зміцненням гвинтових робочих поверхонь. Подано результати експериментальних досліджень впливу матеріалу та геометричних параметрів оправы і стрічки на зусилля формоутворення. Представлені експериментальні дані проточування зовнішніх гвинтових канавок в

заготовках з різних матеріалів та визначено технологічні параметри. Розроблено нові конструкції технологічного спорядження та методику їх розрахунку.

Ключові слова: технологічний процес, еліпсна гвинтова заготовка, формоутворення, технологічне спорядження, проточування, зміцнення, обкочування, профілювання.

АННОТАЦИЯ

Кучвара И.М. Технологическое обеспечение изготовления деталей эллипсных винтовых рабочих органов машин. – 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, 2016.

В диссертационной работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса изготовления эллипсных винтовых рабочих органов. Предложен способ формообразования винтовых эллипсных заготовок на эллипсную оправу с соответствующим технологическим оборудованием, что поддается быстрой переналадке на широкий спектр размеров в зависимости от потребностей рынка. Выведены аналитические зависимости для определения силовых параметров процесса формообразования профильных винтовых заготовок. На основании выведенных зависимостей можно проектировать технологическое оснащение для обеспечения процесса формообразования заготовок на эллипсную оправу.

Исследован процесс проточки винтовых канавок на эллипсных оправках для формообразования эллипсных винтовых спиралей с заданным шагом. Разработана динамическая модель процесса проточки внешних винтовых канавок, на основании которой произведено нахождение частот собственных и вынужденных колебаний системы, исследовано процесс образования стружки.

Разработана математическая модель процесса укрепления внешней кромки шнека обкаткой, по которой определены максимальные радиальные напряжения, радиальное и тангенциальное усилия деформации шнека и крутящий момент, технологического процесса внешней обкатки с укреплением винтовых рабочих поверхностей.

Разработаны технологические предпосылки профилирования пустотелых эллипсных заготовок на основании определения параметров деформируемых заготовок и выведена аналитическая зависимость для определения момента изгиба. На основании проведенных теоретических исследований построены графические зависимости изменения усилия изгиба и изменения напряжения изгиба при деформации кольцевой заготовки от толщины стенки при различных значениях ее диаметра. Установлено, что решающим фактором в изменении напряжения изгиба является именно диаметральные параметры заготовки.

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния материала и геометрических параметров оправы и ленты на усилия формообразования. Представлены экспериментальные данные проточки внешних винтовых канавок в заготовках из различных материалов и определены

технологические параметры. Разработаны новые конструкции технологической оснастки и методику их расчета.

Ключевые слова: технологический процесс, эллипсная винтовая заготовка, формообразование, технологическая оснастка, проточка, укрепление, обкатка, профилирование.

ANNOTATION

Kuchvara I.M. Technological maintenance of manufacturing parts for the machine ellipse screw operating members. – Manuscript.

The dissertation is submitted for the scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) in specialism 05.02.08 – mechanical engineering. – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2016.

Theoretical and experimental investigations of the technological process for manufacturing ellipse screw operating members have been carried out in the dissertation. The method for shaping of the screw ellipse blanks on the ellipse case with certain technological equipment, which is easily readjusted in different sizes depending on the market needs, has been proposed. Analytical dependences for finding force parameters of the shaping processes of the profile screw blanks and the design parameters of the necessary technological equipment have been deduced.

The process of turning of the screw grooves on the ellipse case for shaping of the ellipse screw spring with the back pitch by developing the dynamic model for turning of the outer screw grooves, has been investigated.

The mathematic model of the process for strengthening of the screw outer edge by rolling, had been developed, taking advantage of which the design parameters of the device can be found as well as the technological parameters of the process of outer rolling, strengthening the screw operating surfaces. The results of experimental investigations on the effect of material and case and the belt geometric parameters on the shaping force, have been presented. Experimental data on the turning of the outer screw grooves in the blanks made of different materials have been presented and technological parameters have been found. New constructions of the technological equipment as well as method for their calculation, have been developed.

Key words: technological process, ellipse screw blank, shaping, technological equipment, turning, strengthening, rolling, grading.