

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах  
рукопису

**НАВРОЦЬКА ТЕТЯНА ДЕМ'ЯНІВНА**

УДК 621.9.04

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

05.02.08 – технологія машинобудування  
13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Навроцька Т.Д.

Науковий керівник:  
Ляшук Олег Леонтійович,  
доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2021

## 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. 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.

Проведено дослідження силових параметрів процесу навивання стрічки на оправу складного профілю. Виведено аналітичні залежності радіуса кривизни профілю оправи, що використовується для визначення сили гнуття.

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 гвинтових секційних заготовок на крок. Встановлено, що збільшення ширини і товщини витка і кута нахилу клина приводить до збільшення крутного моменту на приводі при калібруванні заготовки на крок.

Досліджено динаміку калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок. Виведено диференційне рівняння коливань приведеної системи на основі рівнянь 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, лінійної деформації оправки для калібрування в напрямку осі  $y$  в часі, зміни лінійної деформації клина в напрямку осі  $z$  в часі, зміни лінійної деформації клина в напрямку осі  $y$  в часі. 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.

Наведено методику та результати експериментальних досліджень формування елементів гвинтових секційних робочих органів. Розроблено і виготовлено експериментальні дослідні установки для визначення величини крутного моменту навивання гвинтової секційної заготовки пристроєм з обертовою втулкою, крутного моменту калібрування гвинтової секційної заготовки на крок, зусилля утворення сферичної втулки секції гвинтового робочого органу та тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів. Встановлено, що значення тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів збільшується при збільшенні глибини різання прохідним різцем, подачі прохідного різця та швидкості різання у таких межах змінних параметрів.

Наведено комп'ютерну модель гвинтового секційного робочого органу конвеєра. На основі проведеного комплексу теоретичних і експериментальних досліджень створено конкурентноздатні гвинтові секційні робочі органи, проведено їх техніко-економічне обґрунтування технологій їх виготовлення та розроблено методику інженерного розрахунку. Технічна новизна конструкцій захищена патентами України на корисні моделі та впроваджені у виробництво.

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

## ANNOTATION

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

Dissertation for a Candidate Degree in Engineering by specialty 05.02.08 "Technology of Mechanical Engineering". – 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 of the winding moment on the edge of the tape with constant width and thickness on the outer radius of the hollow forming bushing are obtained. It is determined that the load distribution on the forming rollers depends on the structural device application, on the technological gaps between the tape and the gage formed by the surfaces of the frame and rollers. It is established that the main process of forming (up to 70-90% of the formation of the profile curvature) is accounted for the first roller, where bending on the edge is performed, and the second and third rollers, which complete the process of tape bending.

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 cone windings of the screw workpieces in pitch with technological equipment development is investigated. Analytical dependences for determination of power and constructive parameters of process are derived. 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 technique and results of experimental researches of the screw section working bodies elements formation are presented. Experimental testing installations for the determination of the value of 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 developed and produced. It is determined that the value of the tangential cutting force during grinding of screw sectional working bodies workpieces increases with increase of the depth of cutting by the straight cutter, feed of the straight cutter and cutting speed within such variable parameters.

Computer model of the screw sectional working body of the conveyor is given. On the basis of the carried out complex of theoretical and experimental investigations, the competitive screw sectional working bodies are created, their manufacturing technologies are substantiated on technical and economic basis, engineering calculation technique is developed. The technical novelty of the structures is protected by Ukrainian patents for utility models and introduced into production.

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

## 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 магістралії).*

#### *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. *(Автор 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 III 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.; Третьяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я.; Заявник і патентовласник Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третьяков 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 патентоотримувачі 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 патентоотримувачі 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 В65G 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) В24В 39/04. Обкатний інструмент для зміцнення гвинтових робочих органів / Ляшук О.Л.; Сокіл М.Б.; Третьяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Клендій В.М.; Марчук Р.М.; заявники і патентотримувачі Ляшук О.Л.; Сокіл М.Б.; Третьяков 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*).

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	14
<b>РОЗДІЛ I СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b>	
1.1. Гвинтові секційні робочі органи, характерні конструктивні і технологічні особливості, область їх використання, технічні вимоги.	20
1.2. Характеристика способів формоутворення й аналіз відомих технологічних схем навивання гвинтових елементів	30
1.3. Аналіз конструкцій пристроїв для виготовлення гвинтових елементів ГСРО	37
1.4 Аналіз результатів досліджень технологічних процесів виготовлення гвинтових елементів	42
1.5. Аналіз сучасних методів пошуку нових технічних рішень на основі синтезу	48
1.6 Висновки та завдання дослідження	49
<b>РОЗДІЛ II ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВИГОТОВЛЕННЯ СЕКЦІЙНИХ ГНУЧКИХ ГВИНТОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РІЗНОГО ПРОФІЛЮ</b>	
2.1. Синтез способів навивання спіралей шнеків обертовою втулкою методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу	52
2.2. Дослідження технологічного процесу навивання гвинтових стрічок секцій обертовою втулкою	56
2.3. Дослідження силових параметрів процесу формоутворення секційних гнучких гвинтових елементів різного профілю	70
2.4. Дослідження динаміки процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок	79
2.4.1. Дослідження силових параметрів процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок	79
2.4.2. Динамічна модель калібрування конічної гвинтової заготовки на крок	86
2.5. Висновки	97

### **РОЗДІЛ ІІІ ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИГОТОВЛЕННЯ ШАРНІРНИХ СЕКЦІЙ ГВИНТОВОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ**

3.1. Програма експериментальних досліджень	99
3.2. Конструкція секційного робочого органу	100
3.3. Стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень	103
3.3.1. Стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень виготовлення сферичної втулки (корпуса)	103
3.3.2. Стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень навивання гвинтових заготовок з обертовою втулкою	105
3.3.3. Стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень калібрування гвинтових заготовок	109
3.3.4. Методика проведення експериментальних досліджень величини тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин	110
3.4. Методика проведення багатофакторних експериментальних досліджень	113
3.5. Методика проведення та результати експериментальних досліджень з визначення деформаційних характеристик секційного гвинтового робочого органу	124
3.6. Висновки	126

### **РОЗДІЛ ІV РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ СЕКЦІЙНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ**

4.1. Результати експериментальних досліджень навивання гвинтових заготовок з обертовою втулкою	127
4.2. Результати експериментальних досліджень виготовлення сферичної втулки	137
4.3. Графоаналітичне оброблення результатів експериментальних досліджень зусилля утворення сферично втулки на заготовках	142

	13
4.4 Результати досліджень калібрування гвинтових робочих органів	145
4.5 Графоаналітичне оброблення результатів експериментальних досліджень калібрування витка гвинтової заготовки на крок	148
4.6 Результати порівняння теоретичних і експериментальних досліджень величини крутного моменту на приводі при калібруванні витків на крок	152
4.7 Результати експериментальних досліджень величини тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин	153
4.8 Висновки	160
<b>РОЗДІЛ V ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ГВИНТОВИХ СЕКЦІЙНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ</b>	
5.1. Комп'ютерне моделювання для вибору раціональних конструктивних параметрів гвинтового секційного робочого органу	162
5.2. Технологічність конструкцій гвинтових секційних робочих органів	167
5.3. Інженерна методика розрахунок елементів установки для виготовлення гвинтових секційних робочих органів.	
5.3.1. Розрахунок навантаження на ролик	172
5.3.2. Розрахунок сил і напружень у ролику	175
5.4. Технологічне оснащення для контролю якості деталей гвинтових механізмів	179
5.5. Техніко-економічна оцінка способу навивання спіралей шнеків обертовою втулкою	182
5.6. Висновки	186
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>	188
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	192
<b>ДОДАТКИ</b>	208

## ВСТУП

**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 методику 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» (сmt. 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 [39, 89, 99, 143], досліджено силові параметри формоутворення гвинтових елементів різного профілю [56, 57], розглянуто підвищення надійності і довговічності гвинтових секційних робочих органів [113], згину гнучкого гвинтового конвеєра виготовленого з секційних елементів [22], відпрацювання конструкції гвинтових секційних робочих органів на технологічність [28], розглянуто методику проектування гвинтових робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів [91], досліджено динаміку процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок [55], представлено особливості проектування та виготовлення навивних заготовок деталей машин [74, 97, 102, 128] та результати їх експериментальних досліджень [75], запропоновано конструкції механізмів ГСРО [52, 99, 106, 105, 108] спорядження для контролю конструктивних параметрів заготовок [99, 100, 107]. 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 рисунок, 22 таблиць, список використаних літературних джерел із 147 найменувань, 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації – 155 сторінок.

## РОЗДІЛ І

### СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### **1.1. Гвинтові секційні робочі органи, їх характерні конструктивні і технологічні особливості, область використання, технічні вимоги і норми точності**

Механізми із гвинтовими секційними робочими органами отримали широке використання у всіх галузі сільського господарства, що досягнули високій продуктивності праці, простих конструкцій, зручності в експлуатації, що дає змогу застосування їх як у технологічних схемах, або в складі високопродуктивних автоматичних ліній. Вони відповідно досить екологічний вид транспорту.

Гвинтові секційні робочі органи гвинтових конвеєрів (ГСРО) – це високопродуктивний механізм, який застосовують для транспортування сипких матеріалів, а саме сипких матеріалів, мінеральних добрив у різних галузях народного господарства. Дані механізми застосовують не тільки для транспортування сипких матеріалів як по горизонтальній, нахиленій та вертикальній магістралі, а також переміщення вантажів із різними магістралями з мінімальним радіусом кривини  $R_k = 1,2$  м при продуктивності до 20 т/год і довжини магістралі 20 м. [24, 27, 31].

Дані пошуку оптимальних схем ГСРО, які використовуються для транспортування сипких матеріалів по криволінійних магістралях, розглянуті з метою створення нових робочих органів, котрі між собою відрізняються за конструктивною різноманітністю, технологією виготовлення та функціональним призначенням.

Відомі конструкції ГСРО гвинтових конвеєрів за способом завантаження матеріалу поділяють на одно- та двомагістральні. Один з варіантів компоновки такого робочого органу зображено на рис. 1.1. Перевагою даних конвеєрів є виготовлення їх робочих органів з високовуглецевої сталі, що підлягають

термічній обробці. Проте, термічна обробка відбувається тільки у некаліброваному стані. Недоліком є низька продуктивність при транспортуванні.

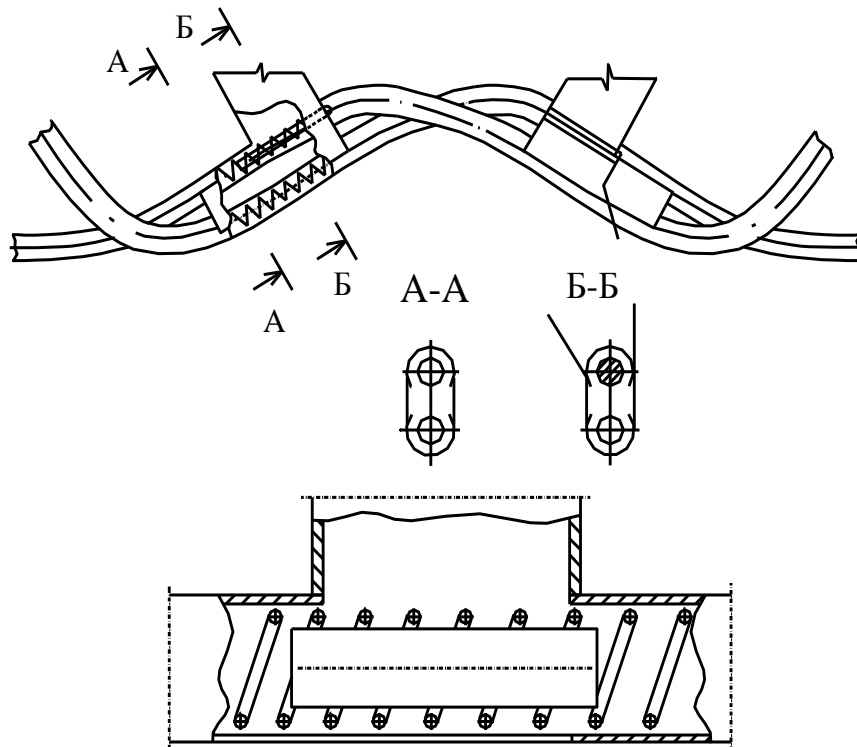


Рис. 1.1. Робочий орган гвинтового конвеєра з прутковою безвальною спіраллю

На рис. 1.2. представлено робочий орган квинтового перевантажувального механізму (ГПМ) (А.с. СРСР №1719285), несучі гвинтові елементи якого виконано у вигляді пластмасових втулок 1 із зовнішнім гвинтовим ребром 2, розташованих на центральному тросі 3. Передача крутного моменту здійснюється за рахунок торцевих фігурних гнізд 4 та виступів 5 сусідніх втулок. Конструкція розглянутого робочого органу по своїй суті визначає напрямок вирішення проблеми, однак є недосконалою, оскільки в процесі роботи постійно змінюються площі контакту вузлів передачі моменту, що спричиняє значні коливання величини контактних напружень і, відповідно, інтенсивне зношування торцевих виступів і впадин.

На основі аналізу патентної та наукової літератури, можна констатувати, що перспективними напрямками їх розвитку є застосуванням робочих органів відомих моделей гнучких гвинтових конвеєрів у вигляді комбінацій

гвинтових спіралей для переміщення вантажу і передачі крутного моменту гнучким валом [24, 27, 29, 31, 71, 76, 85, 86, 114-115].

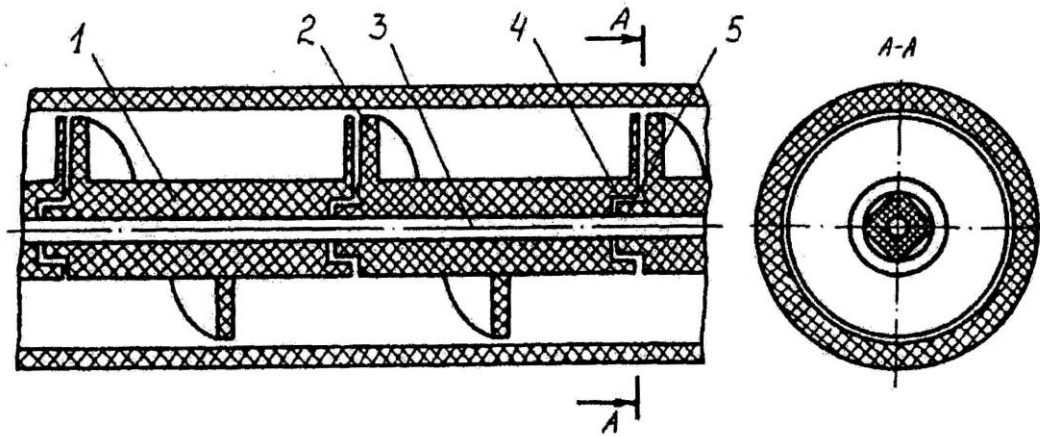


Рис. 1.2. Гвинтовий перевантажувальний механізм з секційним гнучким валом

Для транспортування вантажів на певні відстані (10 м і більше) потрібно підвищити крутильну жорсткість гвинтових робочих органів. Таким представником є гнучкі стрічкові робочі органи з горизонтальними та вертикальними спіралями, які наведені на рис. 1.3 (а - А.с. № 1315369; б - А.с. № 1801886). Гнучкий вал який виконано у вигляді двох різнонаправлених смугових пружинних спіралей (рис. 1.4 а), що утворює стискування між собою, однак в процесі кручення діаметр зовнішньої спіралі зменшується, а внутрішньої - збільшується.

За рахунок гнучкого валу здійснюється передавання крутного моменту в робочому органі. Функції внутрішньої спіралі в зоні приводу робочого органу здійснює армований гумовий шланг (рис. 1.4 б).

Недолік даної конструкції є підвищення зношування поверхні контакту горизонтальної спіралі, яка здійснює тертя між собою під час роботи ГПМ на криволінійній трасі. Дані робочі органи використовують на довгих (більше 10 м) магістралях транспортування, із незначної кривини.

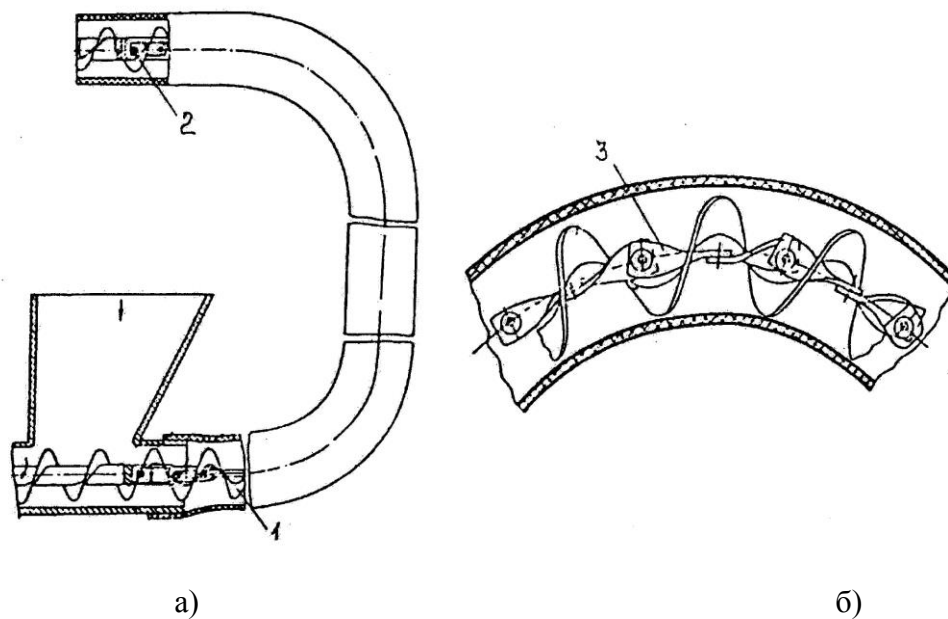


Рис. 1.3. ГПМ з секційними робочими органами

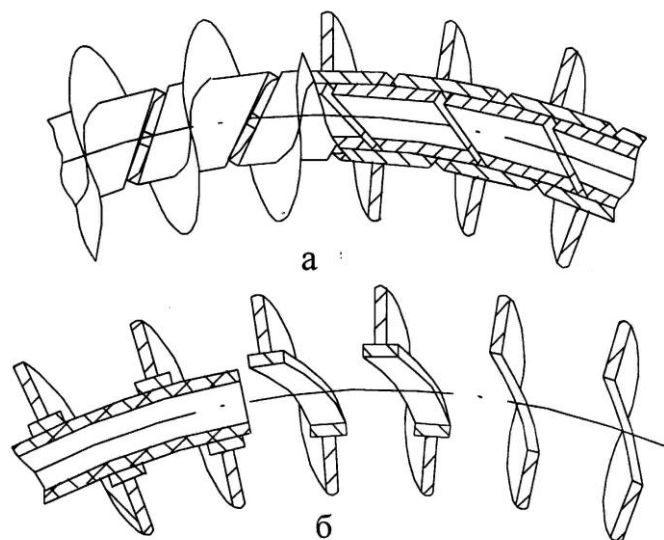


Рис. 1.4. Гнучкі робочі органи з горизонтально-несучою (а) і вертикально-технологічними (б) спіралями

Варто сказати, що технологічний процес виготовлення довжиною 1 м гнучких гвинтових спіралей досить трудомісткий. Для покращення фізико-механічних властивостей в процесі навивання та прокатування гвинтових спіралей використовуються низьковуглецеві сталі, що не піддаються термічній обробці. При застосуванні хіміко-термічної обробки навивних заготовок на оправках довжина яких 1.2...1.5 м підвищується пружні властивості заготовок, та покращується експлуатаційні параметри робочих органів в процесі діяльності

по криволінійній траєкторії [24]. Під час виготовлень спіралі з високовуглецевої сталі (вміст вуглецю більше 0,5%) необхідно тільки “гарячої” технології навивання, на високоточних та спеціальних обладнаннях, що послідовно до різкої їсобівартості продукції.

Тому, одними із напрямками вирішень технічних питань між конструктивними вимогами та технологія виготовлення спіралі з високовуглецевої сталі  $C > 0,5\%$ , а технологічного виготовлення необхідно сталі яка має вміст вуглецю  $C < 0,15\%$ ) є розробками гнучкого робочого органа з складу гвинтових робочих пелюстків та центрального еластичного валу.

Варіант так званої опрацьованої проблеми наведено на рис. 1.5 (А.с. № 1801887). Гвинтова пластина, яка виготовлена з високовуглецевої сталі при цьому використаний метод штампування та гнуття з подальшими обробками, а саме термічна. Однак основні проблеми, даної конструкції робочого органа не повній мірі вирішене, а саме його конструктивне виконання та механізми з’єднання гвинтових пелюстків до несучого еластичного вала.

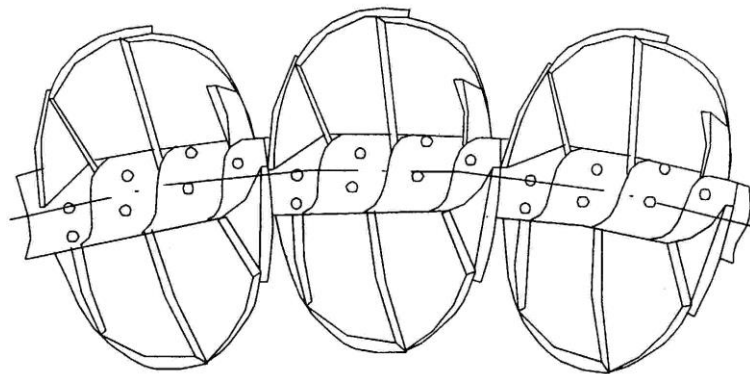


Рис. 1.5. Конструкція робочого органа з набором гвинтових пелюстків і несучого валу

Найбільш доцільним є використання несучої основи у вигляді шарнірних з’єднань для підвищення надійності та довговічності. Одним із прикладі наведено робочий орган який представлено на рис. 1.6 (Патент України №25586А).



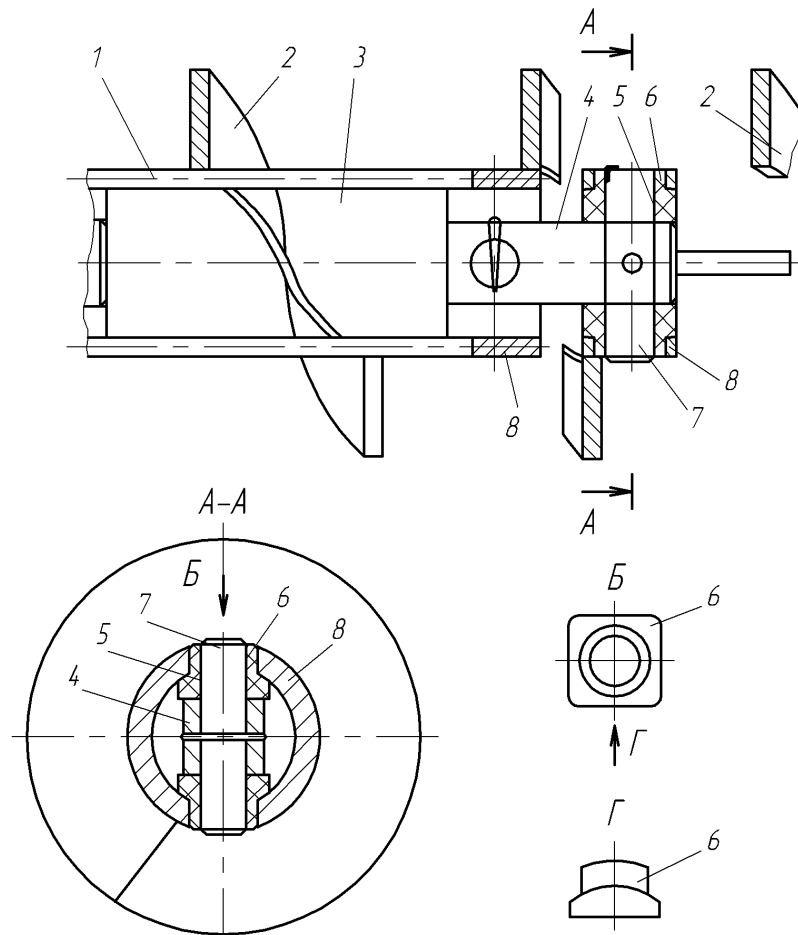


Рис. 1.6. Шарнірний робочий орган гвинтового конвеєра

Його дані секційні елементи виконано двох циліндричних втулок 8, які з'єднані між гвинтовими елементами прутком 1, до яких кріплять гвинтове ребро 2. У середині втулок секції здійсненні наскрізний отвір 5, центральна вісь розташована перпендикулярно. В отворах встановлено антифрикційну втулку 6, а квадратні палеці 4 розміщені між торцевими поверхнями. Серед основних недоліків варто відмітити високу погонну масу, яка має негативний вплив на ступінь пошкодження переміщення вантажу.

В іншому варіанті, який зображено на рис. 1.7, використання діаметрально розташованих пар кульок, які здійснюють таку саму роботу, що наведено конструкція гвинтового робочого органу на рис. 1.6. Недоліком такого технічного рішення неможливо забезпечення точне виготовлення даного робочого органу.

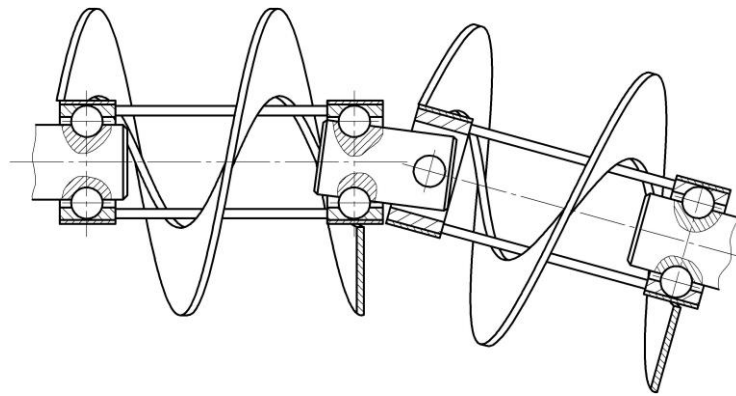


Рис. 1.7. Шарнірний робочий орган з радіальними кульковими елементами зачеплення

На рис. 1.8 зображено робочий орган гнучкого гвинтового конвеєра [142], складовими частинами є секції циліндричної трубки з пазом, до якого з'єднана гвинтова спіраль. У даний паз вмонтовано пальці, що мають зовнішні діаметри менші чим внутрішні та перпендикулярно приєднанні до циліндричних трубок.

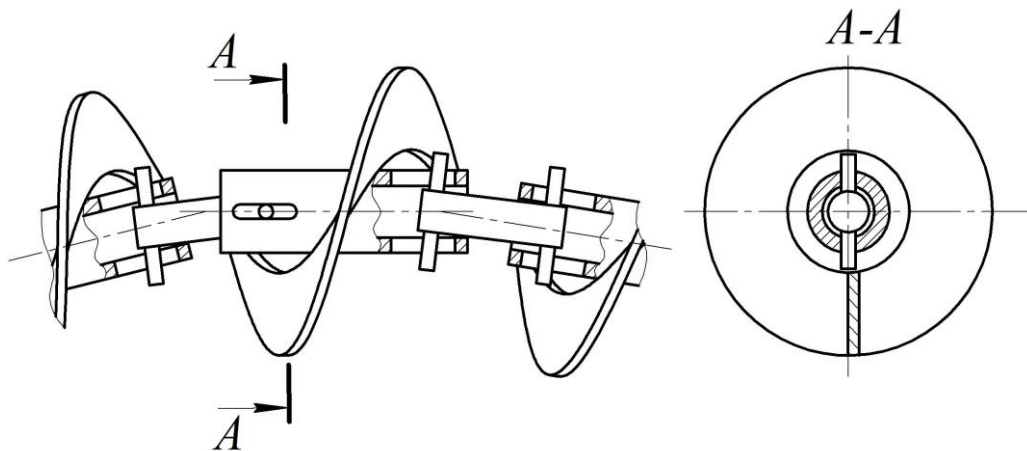
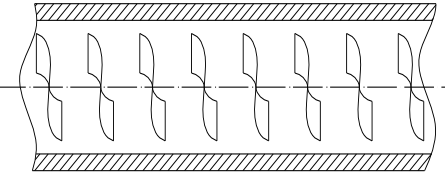
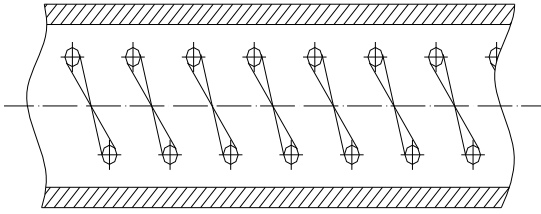
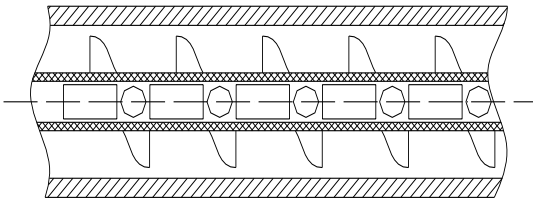
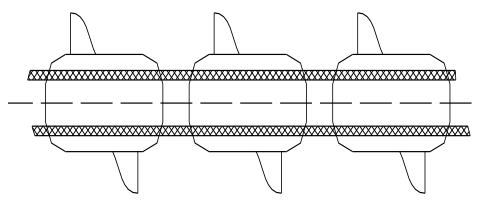
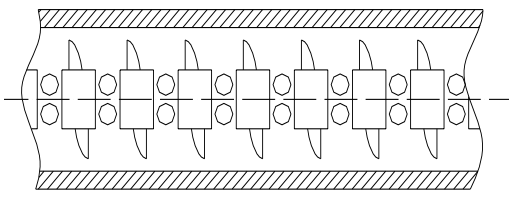
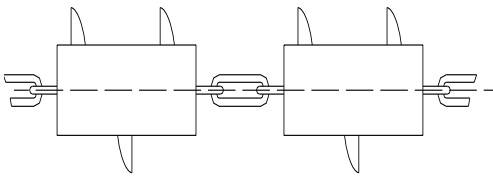


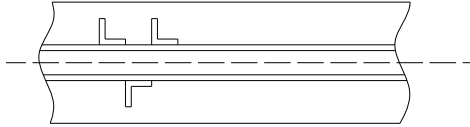
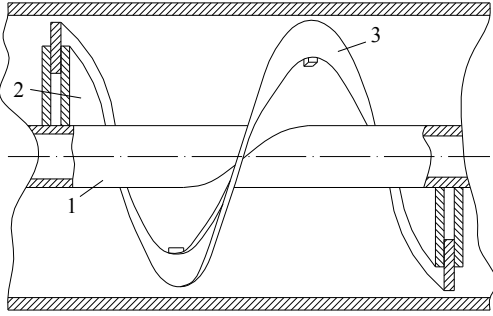
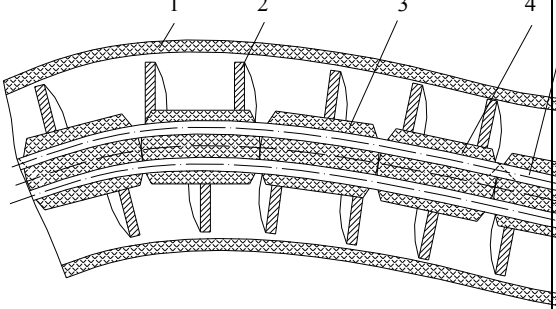
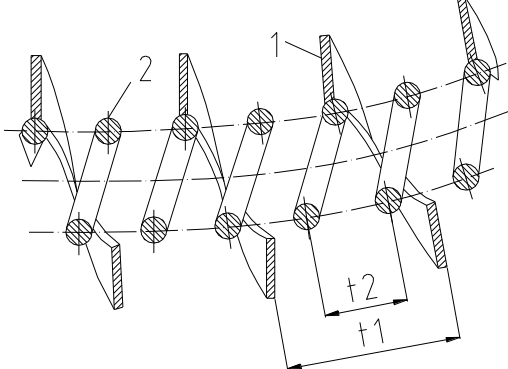
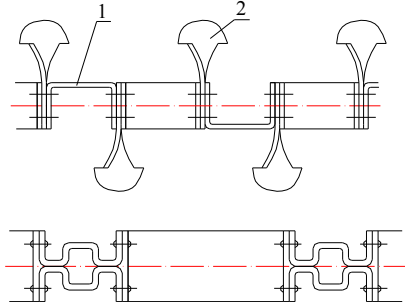
Рис. 1.8. Шарнірний робочий орган з радіальними пальцевими елементами зачеплення

З вибором різноманітних конструкцій та функціональних призначень з використанням в народному господарстві гвинтові механізми, вибір гама матеріалу для виготовлення гвинтових елементів ГСРО широкий. В таблиці 1.1 представлено основні конструктивні схеми ГСРО

## Конструктивні схеми ГСРО

№ з/п	Гнучкий робочий орган	Конструктивна схема	Недоліки
1	2	3	4
1	Спиральний		Низький ресурс роботи
2	Дротяний		Мала продуктивність
3	Спиральний з гнучким валом		Низька крутильна жорсткість
4	Спиральний з несучим гнучким валом		Складність при ремонті
5	Секційний з пластмасовими втулками		Низька навантажувальна здатність
6	Секційний з ланцюговим з'єднанням		Низька навантажувальна здатність

Закінчення таблиці 1.1

1	2	3	4
7	Г – подібний з циліндричною привідною спіраллю		Низький ресурс роботи
8	Спіральний з несучим гнучким валом		Мала продуктивність
9	Секційний з направляючими тросами		Низька навантажуваль на здатність
10	Спіральний з несучим пружинним валом		Низька маневреність за рахунок великої жорсткості
11	Спіральний з П- подібними пластинами		Низький ресурс роботи, низька крутильна жорсткість

Вимоги які ставляться до матеріалу для виготовлення гвинтових елементів це пластичне деформування в процесі виготовлення, міцність елементів згину та крученні, в процесі роботи нормальне припрацювання, пружні властивості матеріалів, невеликі деформації при термообробці.

Виготовлення гвинтових елементів конструкцій ГСРО із матеріалів легованої конструкційної сталі, алюмінією і міді та іншого матеріалу. Для тих, гвинтових заготовок використовуються марки сталі Ст 3, 08 кп, 10 кп. При застосованні технологічних методів підвищення твердості гвинтової стрічки за зовнішнім діаметром здійснюється нанесення на робочі поверхні покриття хрому, нікелю.

Технічні вимоги які ставляться для виготовлення <u>ГСРО</u> :
Основні технічні вимоги, щоб <u>вконувалися</u> згідно ГОСТ2705-73.
Квалітет за зовнішнім і внутрішнім діаметром 8-12.
Співвідношення ширини гвинтового елемента до товщини $b' = 10...20$ .
Зміна <u>товщин</u> смуг по ширині $b' = 0,05 - 0,1\text{мм}$ .
Ширина <u>некатаної</u> зони при прокатуванні $b = 2,4 - 2,8\text{мм}$ , а при навиванні $b' = 10 - 15\text{мм}$
Максимальна ширина елемента 100 мм
Наявність тріщин і <u>задирів</u> неможливо на <u>поверхнях</u> <u>ГСРО</u> .
Твердість гвинтових заготовок $HRC42$ .
Граничні відхилення $IT \frac{16}{2}$ .

В результаті огляду конструкцій ГСРО встановлено, що виготовлення гвинтових елементів досягається до 8–12 квалітетам точності, а шорсткість  $R_z=10...20$  мкм. В процесі транспортування і перемішування сипких вантажів необхідно розробка та дослідження технологічних основ проектування прогресивних технологічних процесів виготовлення ГСРО з відповідними технологічними устаткуваннями, різальними та вимірювальними інструментів для здійснення надійності гвинтових елементів робочих органів.

## 1.2. Характеристика способів формоутворення й аналіз відомих технологічних схем навивання гвинтових заготовок

Сучасний розвиток народного господарства країни вимагає значного розширення номенклатури деталей машин і механізмів, удосконалення відомих і створення прогресивних технологій їх виробництва. З зниженням собівартості виготовлення та ремонтно-відновлювальних робіт за допомогою розширення функціональних можливостей машини необхідно займатись проектуванням деталей, вузла або машини перед якими ставлять високі вимоги для надійності, продуктивності та інших технічних факторів. Це, безумовно, зменшить термін окупності машин і збільшить їх конкурентноспроможність на сучасних, вітчизняних та закордонних машинах. Для виготовлення різної номенклатури деталей машин необхідно забезпечити вимоги до створення гвинтових заготовок.

Гвинтові заготовки (ГЗ) мають безліч номенклатури, а саме циліндрична, конічна, еліпсна або профільна форма з гвинтовою поверхнею. Основними конструктивними параметрами гвинтових заготовок є зовнішній діаметр  $D$ , внутрішній діаметр  $d$ , товщина заготовки  $B$ , товщина одного витка заготовки  $H$  і кількість витків  $n$ . Залежно від способу одержання заготовки, товщина витка може змінюватись від  $H$  за внутрішнім до  $h$  за зовнішнім краєм.

Проведені виробничі дослідження на сучасних устаткуваннях з використанням ГЗ можливе тільки з високопластичних матеріалів, а саме при коефіцієнті нерівномірності витягування для великих зовнішніх і малих внутрішніх діаметрів, характеризується здатністю смуги до операцій пластичним деформуванням.

В процесі виготовлення гвинтових заготовок використовують метод штампування, навиванням смуги на оправку або прокатуванням.

У процесі виготовлення ГЗ недоліком методу штампування є велика кількість витрати матеріала при вирізанні кілець. Внаслідок цього якість даних

кілець нища в порівнянні із суцільними гвинтовими поверхнями; даний виробничий процес вимагає велих площ та ускладнює автоматизацію.

Відомі такі методи навивання (рис. 1.9): навивання на оправку заготовки заданого кроку; навивання стрічки на оправу щільне; навивання стрічки на оправу шляхом безперервного її сходженням із робочої зони; навивання профільне. Вище вказаними методами одержують гвинтові заготовки в дуже широкому діапазоні зміни їх основних параметрів. Виробництво багатьох деталей з основними гвинтовими елементами із заготовок, які виготовлені навиванням є набагато економічнішим, ніж отримання їх із кільцевих штампованих заготовок.

Враховуючи те, що процес згинання широких стрічок на ребро нестійкий, для здійснення їх навивання необхідно завжди мати спеціальні пристрої. Процес дослідження дискретного, а також неперервного щільного навивання витків із послідуочим їх розтягуванням, показали, що даними методами можна також отримати спіралі в дуже широкому діапазоні зміни їх основних параметрів. Розрізняють наступні способи здійснення навивання стрічки на оправу: дискретний (на оправу навивають гвинтову стрічку, яка приблизно дорівнює довжині однієї спіралі) і неперервний (коли на оправу навивають спіраль, довжина якої також регламентується довжиною заготовки а також можливостями устаткування). Неперервний спосіб передбачає розрізання виробів на наперед задану довжину за ходом процесу [27, 112].

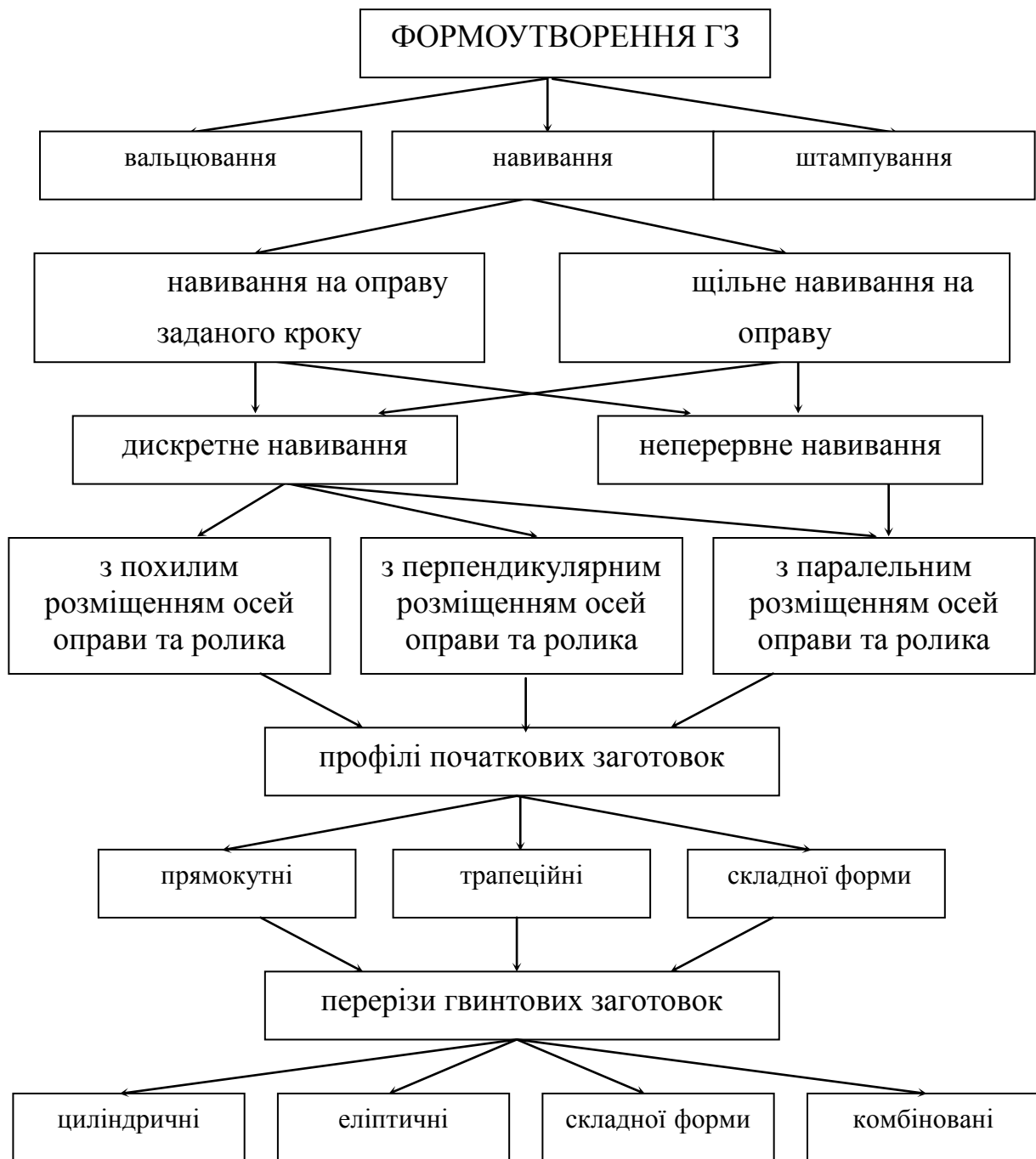


Рис. 1.9. Методи навивання ГЗ на оправу

Схема дискретного процесу, зображена на рис. 1.10 [27] характеризується можливістю навивання заготовок із смуг прямокутного перерізу з відношенням ширини смуги до її товщини в межах 10. Довжина заготовки обмежується розмірами оправу.



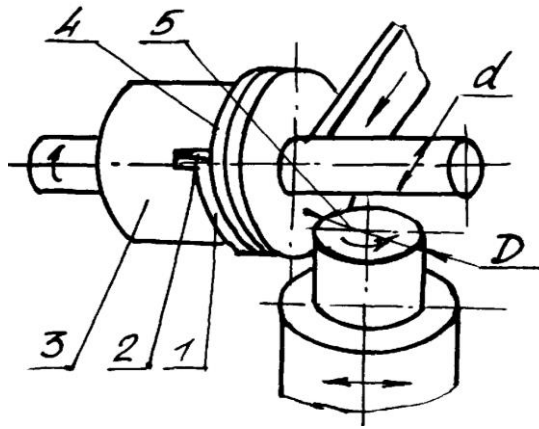


Рис. 1.10. Технологічна схема технологічного процесу навивання стрічки на оправу

Для неперервного навивання використовують схему, наведену на рис. 1.11 [27]. Кінець смуги 1 згинають під кутом  $90^\circ$ , встановлюють його в осьовий паз і фіксують шпонковою втулкою 2. На торцевій частині втулки з боку смуги зроблено один гвинтовий виток із кроком, що дорівнює товщині спіралі.

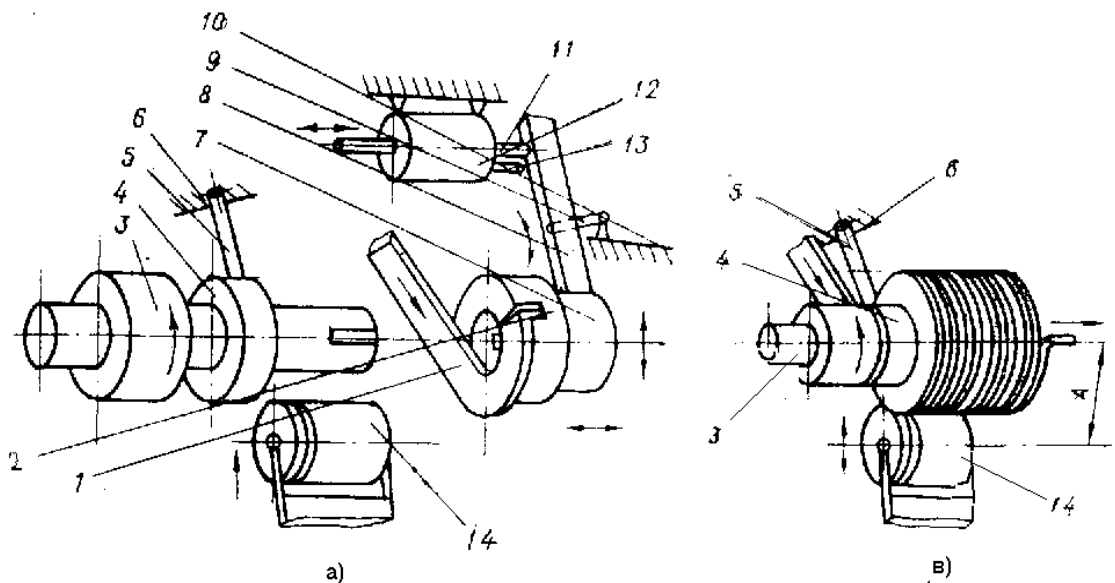


Рис. 1.11. Технологічна схема неперервного навивання гвинтової заготовки на оправу: а - навивання перших 2-3 витків; в - стабільний процес неперервного навивання

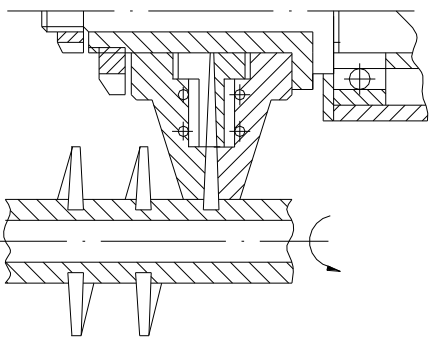
З іншого боку, смуга впирається у гвинтову поверхню нерухомої втулки 4, напрямом гвинтової поверхні якої протилежний втулці 2. Вона вільно

встановлена на циліндричну частину оправки, застопорена за допомогою ручки 5 на нерухомому упорі 6. Довжина шпонкового рівчака на оправі менше від довжини оправки до втулки на  $(3-4) H_0$ , де  $H_0$  – товщина заготовки. Цей вільний простір служить для усунення можливого деформування витка за внутрішнім діаметром. Осьовий затиск смуги здійснюється через втулку 2 упорним підшипником 7, який встановлено в балансірі 8, виконаному у вигляді двоплечового важеля з точкою опори 9, жорстко прикріпленої до супорта 10. Балансир повертається на визначений кут у вертикальній та горизонтальній площинах. Одним кінцем він впирається в шток 11 пневмоциліндра 12, який встановлено на супорті, і контактує з датчиком переміщення 13. В радіальному напрямку смуга притискається до оправки притискним роликком 14, вісь якого розміщена на відстані  $A$  від осі оправки.

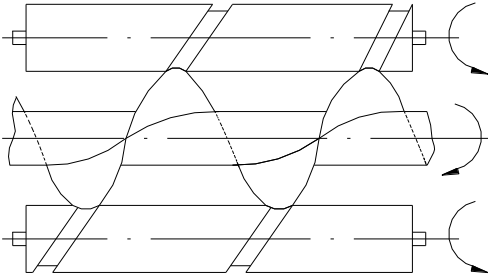
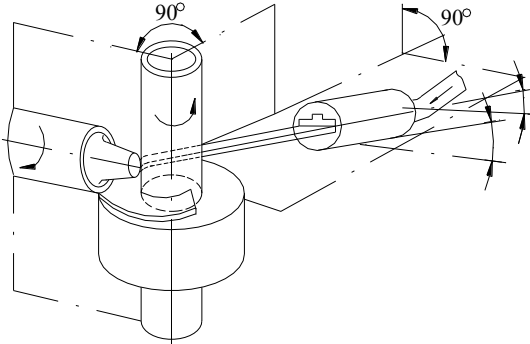
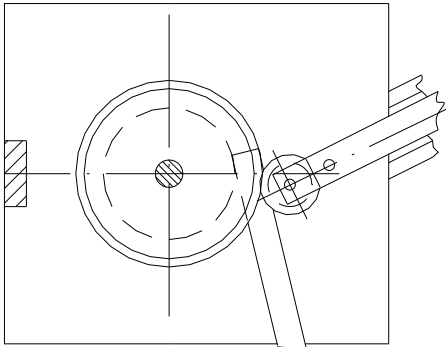
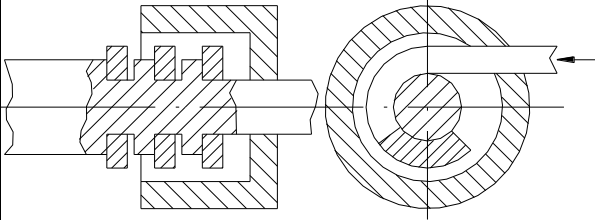
В таблиці 1.2 представлено основні схеми навивання спіралей. Проведений аналіз засвідчив ряд суттєвих недоліків виготовлення, які негативно впливають на показники точності спіралей, обмежують їх функціональні можливості.

Таблиця 1.2

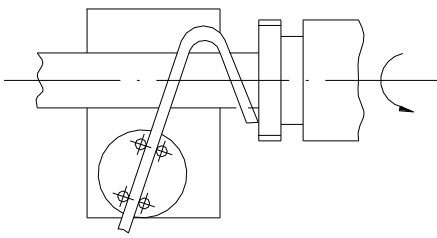
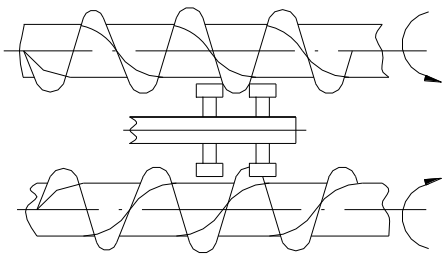
## Основні принципові схеми формоутворення гвинтових заготовок

№ з/п	Назва	Схеми формоутворення	Джерело
1	2	3	4
1	Навивання спіралей за допомогою обтискного ролика		А.с. СРСР 414024

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
2	Навивання гвинтової стрічки з калібруванням		Патент Японії 52.11368
3	Навивання гвинтових заготовок на вал з прокатуванням		Патент США 2812794
4	Навивання спіралей з великим внутрішнім діаметром		Патент США 4112727
5	Навивання стрічки на гвинтову оправу		А.с. СРСР 265850

## Закінчення таблиці 1.2

1	2	3	4
6	Навивання спіралей на оправу на токарному верстаті		А.с. СРСР 438474
7	Навивання гвинтової стрічки з калібруванням		А.с. СРСР 632452

Так, недоліком схем 1, 6 є низька стійкість процесу навивання та низька точність кроку. Схеми 3, 5 забезпечують навивання спіралей з мінімальною питомою висотою, потребують високоточного устаткування, характеризуються високою собівартістю виготовлення.

Недоліком схем 4, 7 є неможливість або складність навивання високоточних спіралей, втрата стійкості стрічки в процесі згинання на ребро. Схеми 2, 6 дозволяють позбавитись від гофроутворень по внутрішньому діаметру за рахунок додаткового обмеження переміщення металу в осьовому напрямку та прикладенню радіальної сили в зоні деформації, завдяки чому можливе навивання стрічки зі значно вищою питомою висотою, верхня межа якої обмежується граничними деформаціями зовнішніх шарів металу.

Проте, розглянуті методи формоутворення гвинтових заготовок не дозволяють вирішити комплекс проблем, пов'язаних, в першу чергу, з підвищенням точності одержуваних спіралей, а саме: забезпечення належних допусків на розміри витих заготовок, зменшення різниці товщини зовнішнього й внутрішнього ребер спіралі та мінімальних внутрішніх діаметрів, забезпечення рівномірності спіралі, збільшення питомої висоти спіралі.

### 1.3. Аналіз конструкцій пристроїв для виготовлення гвинтових елементів ГСРО

Пристрій для виготовлення спіралей шнеків (рис. 1.12) (патент №360131). Згинання смуги 1 здійснюється деформувальними зрізаними конусами 2. Діаметри конусів визначаються умовами захоплення. Один з конусів має торцеву виїмку для заходу спіралі 3. Направлення смуги 1 перед входом у деформувальні валки здійснюється пристроєм 4, формування напрямку навивання і кроку отримуваних спіралей здійснюється відхиляючим пристроєм 5.

Виготовлення спіралей відбувається наступним чином. Смуга 1 прямокутного перерізу по напрямному пристрої 4 подається в зазор між деформувальними конусами. Зазор має трапецієподібний переріз, що звужується в бік більших діаметрів конусів. Обертаючись, конуси прокатують смугу, змінюючи її переріз на трапецієподібний, причому внаслідок різної величини деформації смуги в поперечному перерізі, вона закручується в плоске кільце, яке за допомогою відхиляючого пристрою формується в спіраль. Спіраль може частково заходити в торцеву виїмку конуса, що дозволяє уникнути її викривлення.

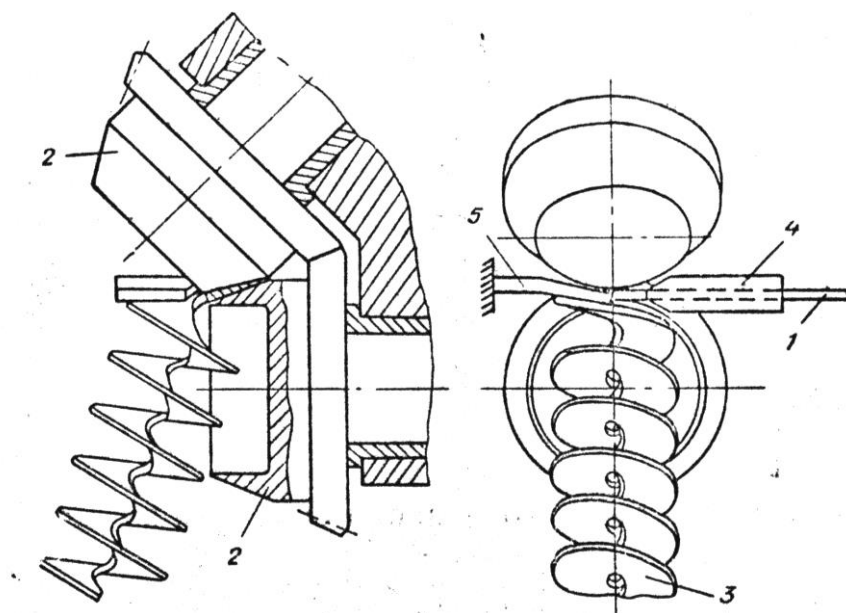


Рис. 1.12. Пристрій для отримання шнекових спіралей

Пристрій для навивання ребер (рис. 1.13) складається з станини 1, опорного кільця 2, шпинделя 3, який обертається на підшипниках в корпусі 4. Корпус шпинделя переміщується механізмом підтиску 5 для отримання необхідного профілю ребра. В станині по напрямних рухається механізм переміщення 6, каретка 7, обладнана підпружиненим накатним 8 і підтримуючим 9 роликками. На рисунку показана також труба, на якій формуються ребра 10 і стрічка 11.

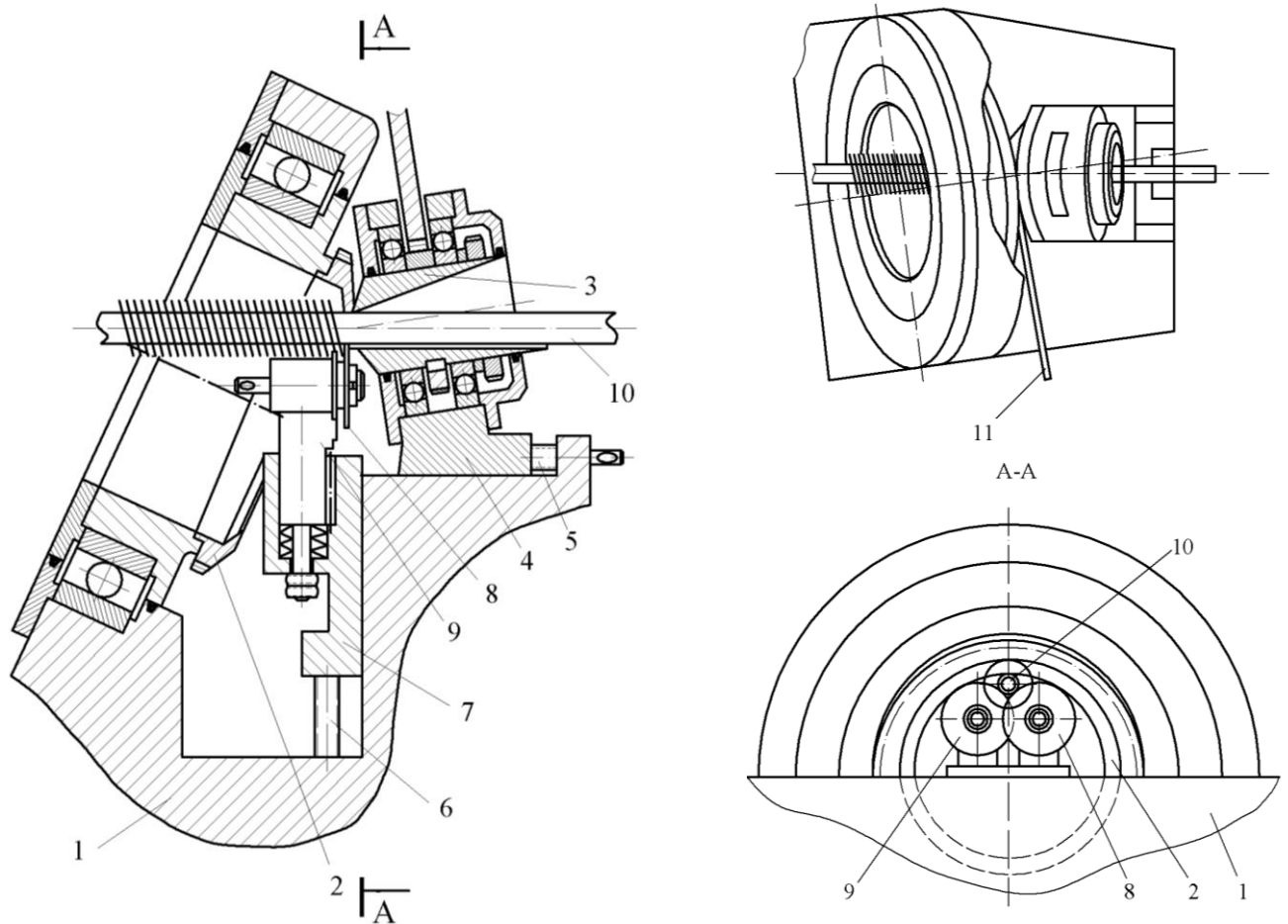


Рис. 1.13. Пристрій для навивання ребер

Опорне кільце 2 розвернуто в горизонтальній площині відносно шпинделя 3 і осі труби 10 на кут  $\alpha$ . Цим досягається зміщення лінії контакту опорного кільця 2 і труби 10 в сторону подачі стрічки 11. Таке зміщення необхідне для того, щоб отримати мінімальну відстань між лінією контакту і точкою завальцювання. Сумістити лінію контакту з точкою завальцювання

неможливо, так як в процесі формоутворення (вальцювання) стрічки відбувається перерозподіл металу як в поперечному перерізі, так і в повздовжньому напрямку. Зміщення лінії контакту від точки завальцювання в бік подачі стрічки дозволяє спочатку сформувати спіраль з внутрішнім діаметром, меншим за зовнішній діаметр труби і рівним діаметру канавки, яка отримується накатним роликом 8.

Механізмом переміщення 6 каретка 7 з підпружиненими роликами 8 і 9 підтискує трубу 10 до робочого ребра опорного кільця 2. Стрічка 11 направляється в зазор між шпинделем 3 і опорним кільцем 2, після чого вмикають привід, який обертає одночасно опорне кільце 2, накатні і підтримуючі ролики 8 і 9 і шпиндель 3.

Накатувальними роликами 8 на трубі виконується канавка, на лінії контакту формується спіраль і попадає в канавку, а в точці завальцювання відбувається закатування спіралі.

На рис. 1.14 зображена технологічна схема неперервного навивання спіралей шнеків [134]. Недоліком цього пристрою є те, що величина робочої поверхні для заходу стрічки в процесі роботи змінюється. Це зумовлено інтенсивним зношуванням інструментів, один із яких нерухомий, а інший рухомий, за рахунок тертя ковзання, внаслідок різної товщини стрічки. Крім того в роботі пристрою зазор може зменшуватись у зв'язку з нагріванням інструменту, яке спричиняється тертям стрічки в каналі нерухомого інструменту, що також призводить до збільшення зусилля формоутворення, зміни параметрів стрічки або її обриву.

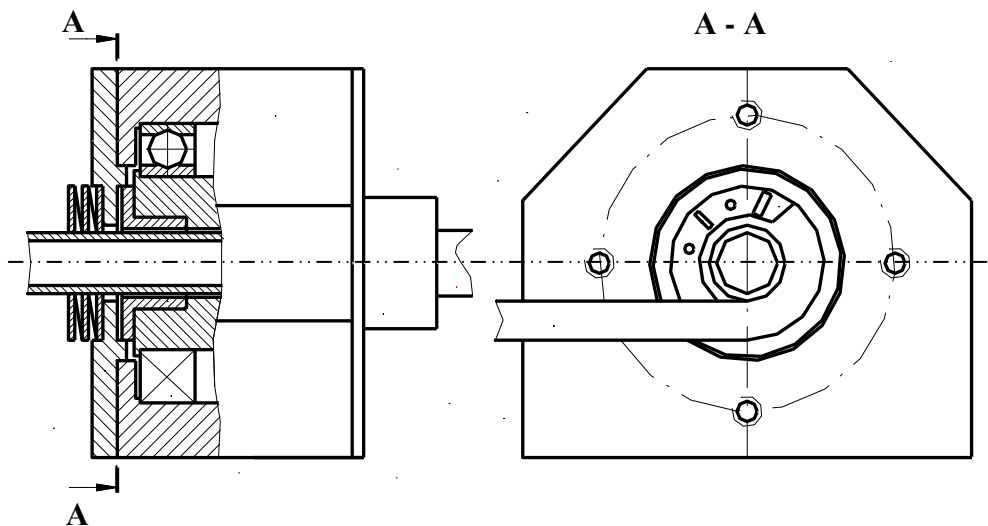


Рис. 1.14. Пристрій для неперервного навивання спіралей шнеків

На рис. 1.15 показано пристрій, позбавлений зазначених вище недоліків [135]. Відмінною особливістю пристрою є те, що він споряджений кришкою, підтисненою до обертового інструменту за допомогою тарілчастих пружин, зусилля стиску яких регулюється за допомогою гайки

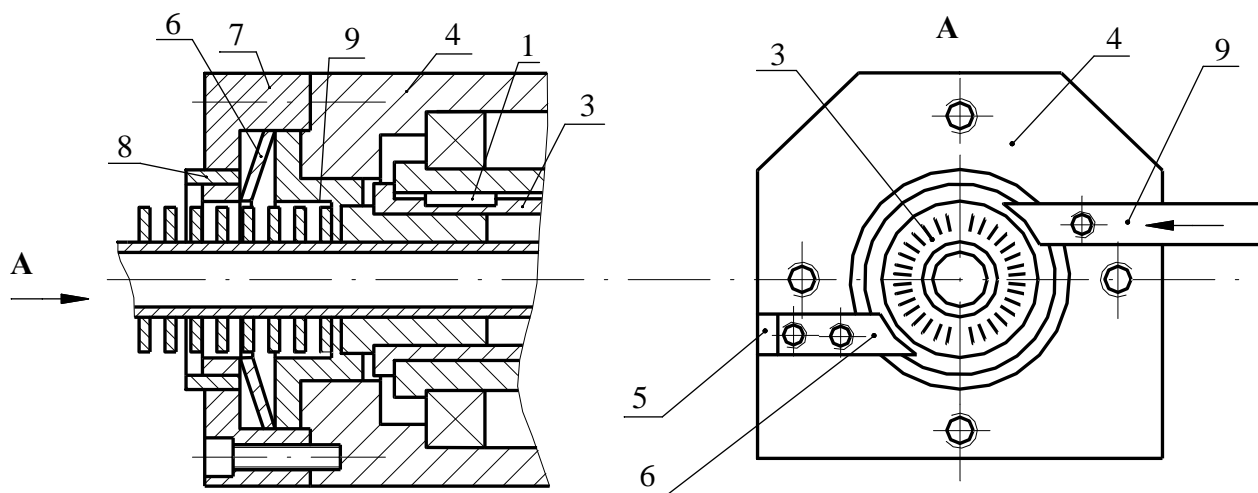


Рис. 1.15. Пристрій для неперервного навивання шнеків

Неперервне навивання спіралей шнеків на заданий крок можна здійснювати за допомогою пристрою (рис. 1.16) [133], його доцільно використовувати для навивання спіралей великих габаритних розмірів. Недолік – складність і ненадійність у роботі, неможливість навивати заготовки з щільним



розміщенням витків.

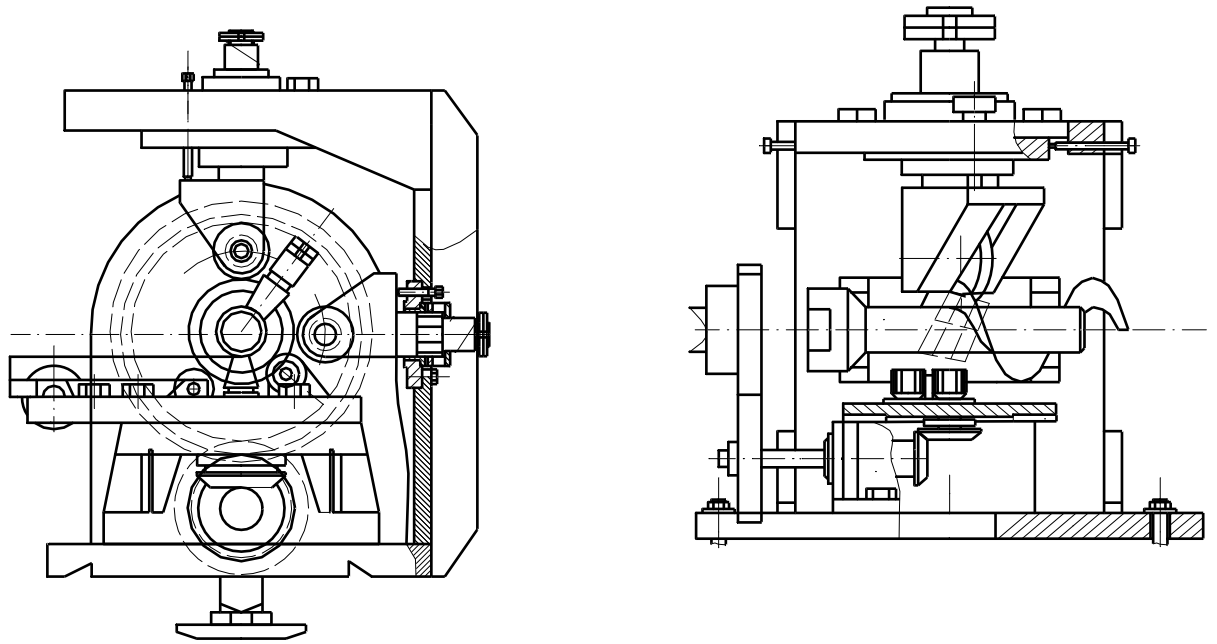


Рис. 1.16. Пристрій для неперервного навивання спіралей

Навивання гвинтових стрічок з одночасним калібруванням в заданий крок можна здійснювати з допомогою пристрою, показаного на рис. 1.17 [132]. Він виконаний у вигляді привідного механізму 1, в якому встановлена оправа 2.

Стрічкова заготовка 3 подається напрямними 4 до механізму формоутворення 13, в якому виконані гвинтові ривці 12 для вільного входу стрічки. Навивання спіралей можна здійснювати або безпосередньо на оправу 7, або на трубу 10, що вільно встановлюється на оправу, до якої можна приварити гвинтову стрічку 11. Після проходження гвинтових канавок 12 механізму формоутворення спіраль своїм зовнішнім діаметром потрапляє у гвинтові ривці 6 калібрувальних роликів 5, які розміщені з двох сторін стрічки, що навивається, і вільно встановлені у двох крайніх опорах корпусу. На калібрувальних роликах виконані гвинтові ривці 6 визначеної глибини і заданого кроку, вони можуть радіально переміщатись. Крім того, для відрізування спіралі за довжиною пристрій споряджено відрізним ножом 8 і жолобом 9. Недоліком пристрою є можливість навивання невисоких стрічок одного типорозміру.

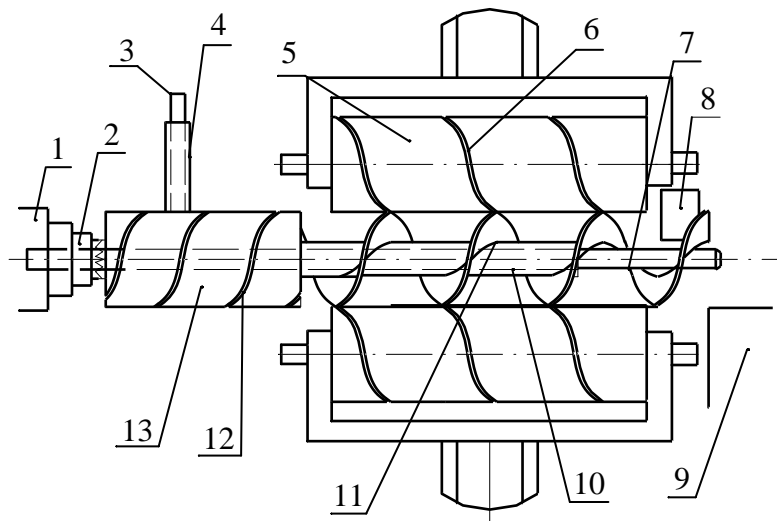


Рис. 1.17. Схема пристрою для навивання гвинтових стрічок  
із заданим кроком

#### **1.4. Аналіз результатів досліджень технологічних процесів виготовлення гвинтових елементів**

Розроблення нових конструкцій деталей гвинтових механізмів передбачає розширення сфери використання механізмів із гвинтовими пристроями та висуває підвищені вимоги до технологічних і конструктивних параметрів гвинтових заготовок, технології їх виготовлення, завдяки чому вони набувають все ширшого застосування у різних галузях народного господарства [17-18, 21, 24, 29, 31, 34, 39, 58, 61, 86, 88, 112, 122-123, 129]. Їх номенклатура та конструктивні особливості визначаються специфікою роботи, яка зумовлена виконанням різних операцій технологічних процесів, їх поєднанням та іншими умовами.

Теоретичні розроблення напружено-деформованого стану процесів формоутворення заготовок згинанням розглянуті в ряді робіт [21, 27, 29, 50, 112, 129]. Особливу увагу заслуговують дослідження, проведені Ю.О. Аверкієвим [1], Н.Н. Малініним [90], Є.М. Мошніним [95-96], І.П. Ренне [120-121], В.П. Романовським [124], які забезпечили створення наукового базису технології виготовлення деталей машин пластичним деформуванням,

теоретичних передумов процесів згинання стрічок, особливостей згину.

Однією з основних операцій технологічних процесів формоутворення спіралей є здійснення гнуття прямолінійної стрічки на ребро. Згинання також здійснюється під дією згинального моменту разом з одночасною дією моментів та поздовжніх і поперечних сил. Для встановлення основні закономірності процесу згинання та виявити поле напружень і деформацій, доцільно визначити основний характер розподілу та зміни величини кривини середньої поверхні в площині згинання.

В процесі згинання частина заготовки по товщині піддається видовженню в тангенційному напрямку, а інша в свою чергу - стиску. В момент деформування, тобто коли зовнішня та внутрішня поверхні мають радіуси кривини відповідно  $R$  і  $r$ , ділянка, що в даний момент не підлягає ні видовженню, ні стиску (носить назву нейтральний шар), має радіус кривини  $\rho_n$ . Тоді ділянки, для яких  $R \geq \rho > \rho_n$  також будуть сприймати видовження в тангенційному напрямку ( $\varepsilon_\theta > 0$ ), а ділянки, для яких  $\rho_n > \rho \geq r$  - підлягають процесу стиску ( $\varepsilon_\theta < 0$ ).

Деформації  $\varepsilon_\theta$  також можуть виникати під дією зовнішніх напружень  $\sigma_\theta$ , які є позитивними (інша назва розтягуючими) для  $R \geq \rho > \rho_n$  і негативними (стискуючими) для  $\rho_n > \rho \geq r$ . За наявності кривини, яка відмінна від нуля, за рахунок тиску шарів виникають радіальні напруження  $\sigma_\rho$ , які є стискуючими для певних зон тангенційного розтягу й стиску.

Розподіл напружень  $\sigma_\rho$  і  $\sigma_\theta$  по товщині заготовки враховуючи граничні умови, для яких  $\rho = R$ ;  $\rho = r$ ;  $\sigma_\rho = 0$ , записується [95]:

$$\left. \begin{array}{l} \text{зона розтягу} \\ \sigma_\rho \approx -\sigma_s \left( \frac{R}{\rho} - 1 \right); \\ \sigma_\theta \approx \sigma_s \left( 2 - \frac{R}{\rho} \right); \\ \text{зона стиску} \\ \text{На нейтральній поверхні} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \sigma_\rho \approx -\sigma_s \left( \frac{\rho}{r} - 1 \right); \\ \sigma_\theta = -\sigma_s \frac{\rho}{r}. \end{array} \quad (\rho = \rho_n) \text{ напруження } \sigma_\rho \quad (1.1)$$

для деяких зон розтягу й стиску рівні між собою. Виходячи з цієї умови, І.П. Ренне [95-96] і Р. Хілл [136] отримали формулу для визначення радіуса нейтральної поверхні:

$$\rho_n = \sqrt{Rr}. \quad (1.2)$$

У процесі згинання певним моментом без зміцнення та без врахування впливу ефекту Баушінгера, як дослідив Р. Хілл [136], товщина заготовки не змінюється. Також встановлено, що у випадку згинання із зміцненням товщина заготовки на деяку величину зменшується. Врахування ефекту Баушінгера в зоні немонотонної деформації виявляє і можливість деякого зменшення товщини заготовки в процесі її згинання.

Використання певних відносних деформацій для оцінки впливу зміцнення на величину напружень, які в свою чергу виникають у заготовці під час згинання, пов'язане з труднощами. Відносна деформація  $\varepsilon_\theta$  в зоні розтягу відповідно відповідає кривій зміцнення першого роду (можливі межі зміни деформації від нуля до безмежності), тоді як відносна деформація  $\varepsilon_\theta$  в зоні стиску повністю відповідає кривій зміцнення другого роду (можливі межі зміни загальної деформації від нуля до одиниці). Для аналізу однієї кривої зміцнення необхідно привести усі деформації до одного роду, тобто виразити, наприклад, деформацію першого роду через деформацію другого роду [96]. Це пов'язано з ускладненням усіх математичних розрахунків і отримуваних основних аналітичних залежностей та можна уникнути використання певних логарифмічних деформацій.

Рівняння прямої, що апроксимує криву зміцнення у логарифмічних координатах, рекомендують також застосувати для аналізу процесу згинання [95]:

$$\sigma_s = \sigma_{T0} \pm \Pi \ln(\rho/\rho_n), \quad (1.3)$$

де  $\sigma_{T0}$  - екстрапольована межа текучості;  $\Pi$  - модуль зміцнення (тангенс кута нахилу прямої до осі деформації).

І. П. Ренне встановив [96], що радіус нейтральної поверхні не завжди залежить від зміцнення у випадку, коли враховується зміцнення лінійної залежності напруження текучості від відносної деформації яка виникає (крива другого роду).

Вивід основних формул для визначення величин згинальних моментів поданий у різних роботах, велику увагу цьому питанню приділив Є.Н. Мошнін [95].

Коли розглядається згинання без зміцнення, якщо згинання здійснюється по дуже великому радіусу, коли нейтральна поверхня також співпадає із середньою поверхнею заготовки ( $\rho_n = r + s/2 = R - s/2$ ), величину згинального моменту для одиниці ширини заготовки можна визначити за залежністю:

$$\begin{aligned}
 M &= \int_{\rho_n}^R \sigma_s \rho d\rho + \int_r^{\rho_n} (-\sigma_s) \rho d\rho = \sigma_s \frac{R^2 - \rho_n^2 - \rho_n^2 + r^2}{2} = \\
 &= \sigma_s \frac{(R - \rho_n)(R + \rho_n) - (\rho_n - r)(\rho_n + r)}{2} = s\sigma_s \frac{R + \rho_n - \rho_n - r}{4} = \sigma_s \frac{s^2}{4}.
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Аналіз проведених основних теоретичних досліджень показав, що використання загальновідомих методик розрахунку процесів пластичного деформування нашкоджується на труднощі, які пов'язані з одночасним впливом різних факторів, які не дозволяють отримати точні розрахунки зусиль і деформацій, що також функціонально відображають реальний вплив основних параметрів на точність формоутворення. Але, зазначені методики розрахунку можна покласти в основу теоретичних досліджень процесів навивання. Так, із вивченням здійснення процесів навивання та розроблення методики врахування все більшого числа основних факторів в аналітичних розрахунках, вони стають точнішими й набагато повніше відображають реальні умови формоутворення. Теоретичні основи основних технологічних методів формоутворення заготовок гнуттям створювались багатьма вченими.

Подальші наукові доробки вчених Г.Я. Гуна, М.О. Зайкова, О.Д. Томленова, Є.О. Попова, В.Т. Мещеріна, М.В. Сторожева, А.В. Третякова, П.І. Полухіна, М.Є.Зубцова, Є.П. Унксова, що запропонували розв'язок ряду теоретичних положень для розрахунків процесів згинання, мають дуже велике практичне значення, зокрема, для створення оптимальних технологій формоутворення гвинтових елементів відомими методами навивання, прокатування та визначення їх основних параметрів.

Особливості процесів згинання стрічок досліджували науковці Ю.О. Аверкієв [1], Є.М. Мошнін [96], І.П. Ренне [107], В.П. Романовський [124], в роботах яких запропоновано формули для визначення напружень, зусиль і згинальних моментів.

Процеси формоутворення заготовок деталей машин шляхом згинання вузької стрічки на ребро досліджені в роботах [1, 95], де також розглянуто схеми напруженого стану та запропоновано основні формули для розрахунку напружень, зусиль і деформацій витих деталей.

Великий внесок у формування наукових основ проектування й дослідження технологічних процесів виготовлення гвинтових елементів здійснили вчені О.М. Григор'єв [44], Л.М. Куцин, Л.В. Погорелій, Г.В. Корнеєв, В.Д. Ткач, Н.К. Штуков, Б.М. Гутьяр та багато інших.

Визначенню конструктивних і технологічних параметрів гвинтових заготовок присвячені такі роботи Л.В. Погорелого, А.Г. Цимбала, М.В. Татьянко, Ю.Б. Аванесова, А.К. Сарапулова та ін. Рекомендації щодо технології виготовлення та вибору основних конструктивних параметрів великогабаритних спіралей наведено в працях О.М. Григор'єва, П.А. Преображенського[44].

Проблемні розроблення та дослідження основного технологічного устаткування, машин та механізмів із шнековими робочими органами викладені у працях науковців Ц.Р. Зайчика, А.В. Іваненка, Г.О. Ждановича, В.Д. Ємельянова, Л.Л. Гельгара, Є.П. Щольца, В.Ф. Пономарьова, М.К. Алексиненка, М.Ф. Харитонова, В.І. Нілова, М.П. Яковлєва, Г.Є. Кантура, М.М. Пушкарьова та багатьох інших дослідників.

Питання продуктивності й вибору основних раціональних конструктивних параметрів витих заготовок досліджували у своїх працях вчені Г. Шенкель, Е. Філяр, М. Дернелл, Х. Герман, М. Н. Лисовой [63, 87,139] та ін.

Розробленням технології виготовлення а також визначення конструктивних параметрів гвинтових стрічок займались В.Е. Гурвич, А.З. Журавльов, В.А. Єгоров, А. В. Церна [64, 67, 119, 126,137] та ін.

На основі комплексних як теоретичних так і експериментальних досліджень, що проведені Б.М. Гевком, Р.М. Рогатинським, М.І. Пилипцем, Р.Б. Гевком, І.Б. Гевком, В.В. Васильківим, Л.М. Данильченко, А.Є. Дячуном, Kozyn, A., Holeyman A. and Lubitz, W. D. Erinofardi, Glawion H., Bismantolo P., Date A., Akbarzadeh A., Mainil A. K., Suryono. A. F., Rosin Erwin, Kaufmann Hans; Kauschinger Martin ApplicantShen Jinxing, Oesterlein Roland; Porteous Tom, Vedsted Flemming, Jacobsen Mogens F. Розроблено дуже високоефективні технологічні процеси виготовлення гвинтових елементів шнеків, впроваджено у серійне виробництво спроектоване устаткування й спорядження, одержано принципово нові конструкції гвинтових заготовок. [140-141, 143-147].

Зокрема, у працях д.т.н., професора М.І. Пилипця розглянуто основні особливості технології виготовлення гвинтових заготовок для різних технологічних схем навивання з використанням та компонуванням розробленого оснащення, які було прийнято за основу для подальшого дослідження. Виведено основні аналітичні залежності для визначення параметрів робочих органів, різнопрофільних гвинтових деталей .

Для процесів формоутворення гвинтових заготовок навиванням введено новий критерій, який також враховує коефіцієнт питомої висоти та радіус кривизи навивної заготовки. З цією метою запропоновано новий показник – коефіцієнт технологічної складності технологічного процесу навивання гвинтових заготовок на оправу ( $K_{mc}$ ), який визначається за залежністю:

$$K_{mc} = \left(\frac{B}{r}\right)^x \cdot K_e, \quad (1.5)$$

де  $x$  – показник степеня функції;

$K_e$  – коефіцієнт, що враховує параметри процесу формоутворення ( $K_e=0,7-1,1$ );

$r$  – радіус оправи.

Попередні дослідження показали, що найбільш стабільний процес формоутворення прокатування здійснюється за умови, коли коефіцієнт нерівномірності витягування  $\psi = \frac{(r+B)}{r} \leq 2.6$ . Тоді

$$K_{mc} = (\psi - 1)^x \cdot K_c. \quad (1.6)$$

Експериментально уточнено основне значення коефіцієнту технологічної складності, який оцінюється зведеною висотою  $b_{зв}$

$$b_{зв} = (\psi - 1)^x K_e b', \quad (1.7)$$

де  $b' = \frac{B}{H}$  - питома висота заготовки.

За результатами усього аналізу встановлено, що існуючі ГСРО потребують дуже істотного удосконалення конструктивних і технологічних чинників ще на початковому етапі проектування та виготовлення їх елементів.

### **1.5. Аналіз сучасних методів пошуку нових технічних рішень на основі синтезу**

Наукові дослідження та пошук нових технічних рішень присвячені праці Г.С. Альтшуллера [3], А.В. Андрейчікова [4], І.В. Белого [9], Б.В. Бірюкова [10], Т.Я. Буша [15], А.В. Брушлинського [14], В.В. Васильківа [19-21], Г.Р. Григорєва [43], Д.К. Джонса [51], В.В. Душинського [60], Б.І. Кіндрацького [72-73], Ю.М. Кузнецова, І.В. Луціва [82-83], І.Б. Гевка [35, 37, 39] та інших.

За допомогою типових математичних моделей описано формалізований метод генерування механічних систем який базується з методом морфологічного аналізу та методом генеруванням структурних моделей [72, 117]. На основі даних методів механічних систем застосовують методи



динамічного програмування та метод Лагранжа [72]. Відповідно для синтезу генерації механічних систем виділяють методи [33]:

- розділення процесів генерації прямого і зворотного мозкового штурму;
- генерація ідей в залежності від встановленого слова або поняття;
- морфологічний аналіз, що забезпечення створення багатомірних таблиць з альтернатив, та їх аналізом і вибором кращим.

Диференціально-морфологічний метод синтезу запропонованою професором Кузнєцовим Ю.М. [82-83] який полягає в тому, що на стадії пошук ефективних структур механічних систем забезпечується комбінованими розчленуваннями на окремі елементи системи, що забезпечує нові якісні працездатні елементи.

В.В. Васильковим [19-21] запропоновано уніфікаційний синтез, який побудовано на основі ідей групової обробки технічних рішень, а також теорії генетичних алгоритмів. В основу запропонованого методу закладено класифікація об'єкта, яка дозволяє поділ на класи, підкласи і групи, яка закінчує формування основної морфологічної одиниці синтезу на групи.

Проте багато питань при здійсненні методу синтезу залишаються недослідженими, а сама конструкція повинна виконувати технологічний процес, який мав би базуватися на встановлені їх конструктивних параметрів.

## **1.6 Висновки та завдання дослідження**

1. Результати проведеного літературно-патентного огляду теоретичних та експериментальних досліджень технологічних процесів формоутворення гвинтових елементів деталей машин дали змогу узагальнити основні критерії їх оцінки.

2. Аналіз відомих технологічних процесів виготовлення гвинтових заготовок методами навивання показав, що вони не забезпечують виготовлення

елементів деталей належного рівня технологічності згідно вимог до таких показників, як працемісткість і собівартість виготовлення, коефіцієнт використання матеріалу, точність. Крім того, чинні технологічні процеси не повністю враховують вплив технологічних факторів на енергетичні параметри процесів формоутворення.

3. Недостатньо досліджені технологічні процеси виготовлення гвинтових елементів і конструкції технологічного устаткування й спорядження та методики їх проектування, вплив обтиску на конструктивні параметри гвинтових деталей. Потребує доопрацювання теорія і технологія навивання, калібрування спіралей робочих органів.

4. Описані проблеми потребують вивчення відомих технологічних процесів виготовлення гвинтових елементів, нових технічних рішень, які дозволяють здійснення підвищення техніко-економічної ефективності їх виробництва

На основі проведеного літературно-патентного огляду теоретичних та експериментальних досліджень технологічних процесів формоутворення гвинтових елементів деталей машин сформовано мету роботи: 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 методику проектування технологічного устаткування для виготовлення секційних гвинтових робочих

## РОЗДІЛ II

### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВИГОТОВЛЕННЯ СЕКЦІЙНИХ ГНУЧКИХ ГВИНТОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РІЗНОГО ПРОФІЛЮ

#### **2.1. Синтез способів навивання спіралей шнеків обертовою втулкою методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу**

Гвинтові елементи є широко вживаними елементами у різних типах машин і механізмів, а також основними деталями секційних гвинтових конвеєрів. Відтак їх створенню приділяється чільна увага. Але незважаючи на значну кількість проведених наукових досліджень у сфері їх технологічного отримання, складність і висока енергоємність процесів їх виготовлення, а також підвищені вимоги до якості, надійності, довговічності та конструктивно-технологічних параметрів цих заготовок, змушує проводити пошук новітніх способів їх отримання. Тому розроблення прогресивного способу навивання спіралей гвинтових заготовок є питання актуальним і сприяє отримання енергоефективної продуктивної технології.

Теорія і практика навивання спіралей шнеків (СШ) пропонує основні способи їх формоутворення шляхом навивання стрічки на різні види оправ. Ці способи також передбачають підтискання стрічки до цих оправ роликami різних типів. Вони є подібними і відрізняються розташуванням ролика відносно оправи та розташуванням стрічки відносно ролика і оправи [19-21, 27, 50, 58, 61, 86, 129, 141]. Проте не так давно було запропоновано і досліджено нові способи навивання СШ з допомогою обертової втулки [39]. Але недоліком цих способів була відсутність стійкості процесу навивання СШ і, особливо, проблематичність залому спіралі на початковому етапі навивання [35-36]. Тому ми запропонували вдосконалений спосіб навивання СШ з допомогою обертової втулки, який включає використання додаткових формоутворюючих роликів.

Метою проведення синтезу методом морфологічного аналізу [82] є отримання конструкцій СШ з покращеними техніко-економічними

характеристиками. Ми використали покращений варіант цього методу синтезу з ієрархічним групуванням [39] конструктивних ознак елементів процесу навивання СШ. Цей метод дозволив проведення генерації альтернатив на відповідних ієрархічних рівнях в межах окремих конструктивних елементів, і дозволив отримати обмежену кількість раціональних конструктивних рішень. Зокрема, при реалізації даного синтезу в таблицю 2.1 включено основні конструктивні ознаки та елементи, що застосовуються при навиванні СШ.

Таблиця 2.1

Морфологічна таблиця конструктивних ознак елементів процесу навивання спіралей шнеків обертовою втулкою

1. Оправа	2. Направляючі заготовки	3. Обертова втулка	Опорна втулка		6. Кріпильна втулка
			4. Степінь вільності	5. Наявність формоутворюючих роликів на поверхні	
1.1. Гладкий вал з кріпильним вузлом	2.1. Ролик	3.1. Наявна	4.1. Рухома в радіальному напрямку	5.1. 3 розташуванням роликів по колу	6.1. Наявна і рухома в радіальному та осьовому напрямках
1.2. Різьбовий вал	2.2. Направляюча поверхня з пазом		4.2. Нерухома	5.2. 3 розташуванням роликів по частині кола	
				5.3. 3 одним роликом	
				5.4. Без роликів	

Морфологічну модель процесу навивання спіралей гвинтових елементів з обертовою втулкою (табл. 2.1) яка виконана у вигляді морфологічної матриці, що створена шляхом числових позначень даних альтернатив які розташованні у морфологічній таблиці [82]:

$$N = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_j = \prod_{j=1}^n K_j, \quad (2.1)$$

де  $n$  – кількість альтернатив конструктивної ознаки елементів;

$K_i$  – альтернативний компонент конструктивної ознаки елемента відповідної підгрупи даного ієрархічного рівня.

$$N_{НСШ} = \left| \begin{array}{c} 1.1 \\ 1.2 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 2.1 \\ 2.2 \end{array} \right| \cap |3.1| \cap \left| \begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 5.1 \\ 5.2 \\ 5.3 \\ 5.4 \end{array} \right| \cap |6.1| = 32.$$

Зрозуміло, що при використанні класичного методу кількість синтезованих варіантів є надмірною для аналізу. Тому ми запропонували метод синтезу ієрархічних груп з поділом їх на підгрупи з використанням морфологічного аналізу [39]:

$$N_1 = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i, \quad (2. \quad 2)$$

де  $z$  – ієрархічний рівень;  $l$  – кількість ієрархічних рівнів;  $x$  – відповідна підгрупа певного ієрархічного рівня;  $q$  – кількість підгруп певного ієрархічного рівня;  $K_i$  – альтернативний компонент конструктивної ознаки елемента відповідної підгрупи даного ієрархічного рівня;  $m$  – кількість альтернатив конструктивної ознаки елементів відповідної підгрупи ієрархічного рівня.

Для використання даного методу було розроблено модель механічної системи «Спосіб навівання спіралей шнеків обертовою втулкою» (рис. 2.1) і проведено закріплення конструктивних ознак елементів за певними підгрупами і відповідними ієрархічними рівнями. Відтак до першого ієрархічного рівня віднесено ознаки елементів процесу 3, 4 і 6; до підгрупи I другого ієрархічного рівня віднесено ознаку елемента процесу 1; до підгрупи II другого ієрархічного рівня віднесено ознаку елемента процесу 2; до підгрупи III другого ієрархічного рівня віднесено ознаку елемента процесу 5.

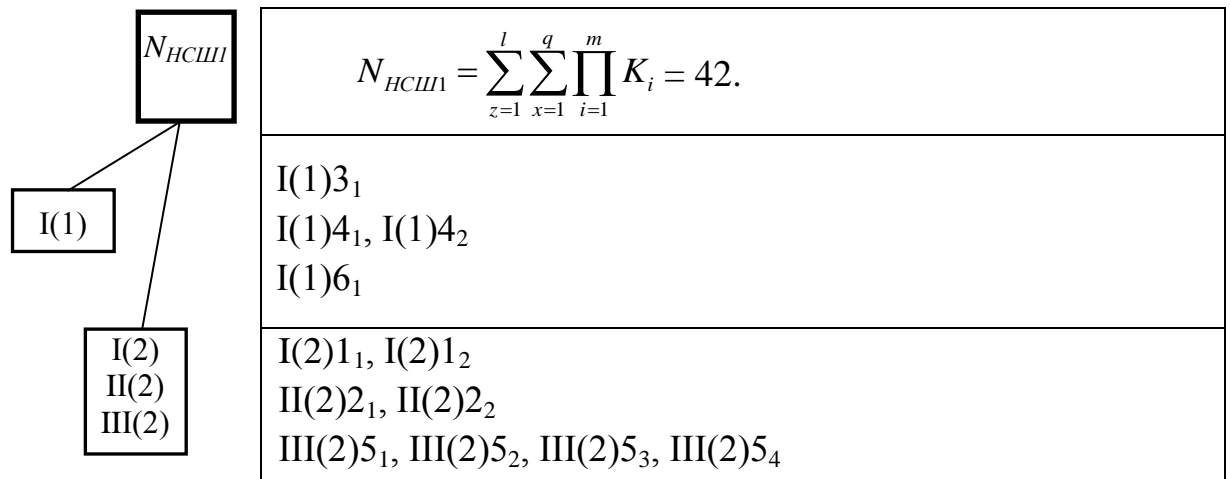


Рис. 2.1. Модель механічної системи «Спосіб навивання спіралей шнеків обертовою втулкою»: (1), (2) – відповідні ієрархічні рівні; I - III – підгрупи ієрархічного рівня

На основі даного методу було здійснено генерування альтернатив у співвідношенні з кількістю генерованих альтернатив з використанням традиційного методу становила менше у 87 разів:

$$N_{HCSH} = \left| \begin{array}{c} 3.1 \\ 4.1 \\ 4.2 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 1.1 \\ 1.2 \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 2.1 \\ 2.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \end{array} \right| = 10.$$

Використовуючи результати морфологічного синтезу, було згенеровано вдосконалені у порівнянні з попередньо розробленими [35-36] варіанти способів навивання спіралей шнеків обертовою втулкою із використанням додаткових формуючих роликів (рис. 2.2). Вони відрізняються лише кількістю розташованих формуючих роликів по колу.

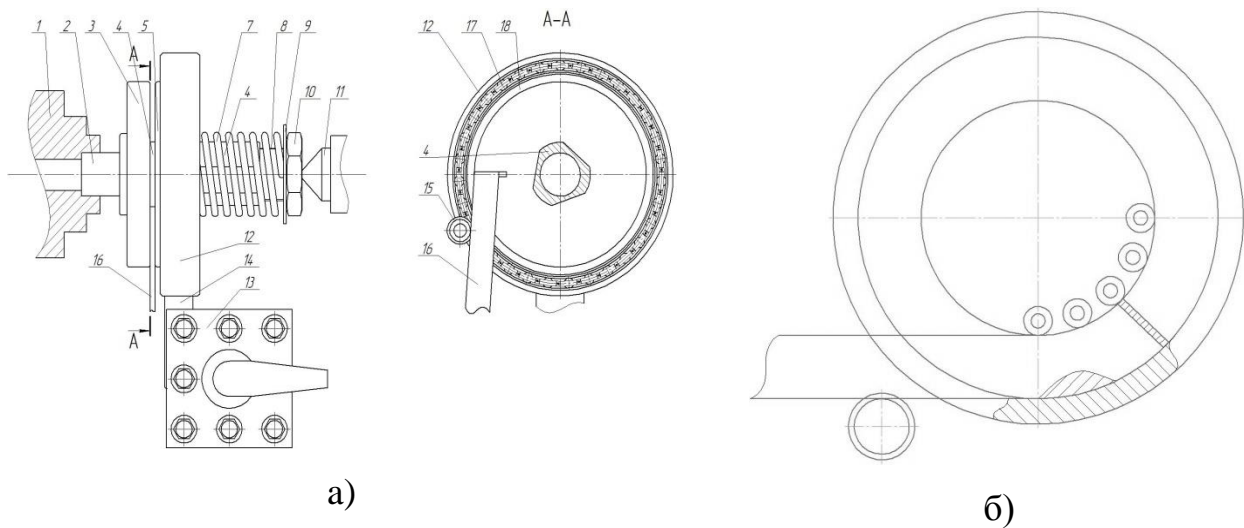


Рис. 2.2. Схеми навивання спіралей шнеків обертовою втулкою:

а) - конструктивна схема навивання спіралей шнеків; б) – вигляд опорної втулки з роликками

## 2.2. Дослідження технологічного процесу навивання гвинтових стрічок секцій обертовою втулкою

При навиванні стрічки на ребро з калібруванням по зовнішньому діаметру внаслідок дії зусилля згину, яке розподілене по контактній зоні притискної оправи, процес навивання має свої особливості. Для їх виявлення розглянемо навивання стрічкової заготовки шириною  $B_0$  та товщиною  $H_0$  у пристосуванні, в якому основним формуючим інструментом є пустотіла обертова формувальна втулка, що формує зовнішній радіус витка  $R$  спіралі, рис. 2.3.

Спіраль формується у пакет, внутрішній радіус якого  $r$ . Згідно [1, 27, 29] при згині (навиванні) стрічки на ребро має місце плоско-напружений стан, при якому виділений поздовжній елементарний шар змінює розміри свого січення як в радіальному, так і в поздовжньому напрямках. В роботі [27] показано, що в цьому випадку товщина стрічки змінюється за законом:

- для зони розтягування

$$h_R(\rho) = H_0 \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{4-2\rho/R}}; \quad (2.3)$$



- для зони стискування

$$h_r(\rho) = H_0 \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{1,5}{\sqrt{\rho/R}} - 1}. \quad (2.4)$$

де  $\rho$  - біжучий радіальний параметр виділеного поздовжнього шару навитої стрічки;  $\rho_0$  - радіус нейтрального шару деформації, довжина якого при навіванні (згину) не змінюється.

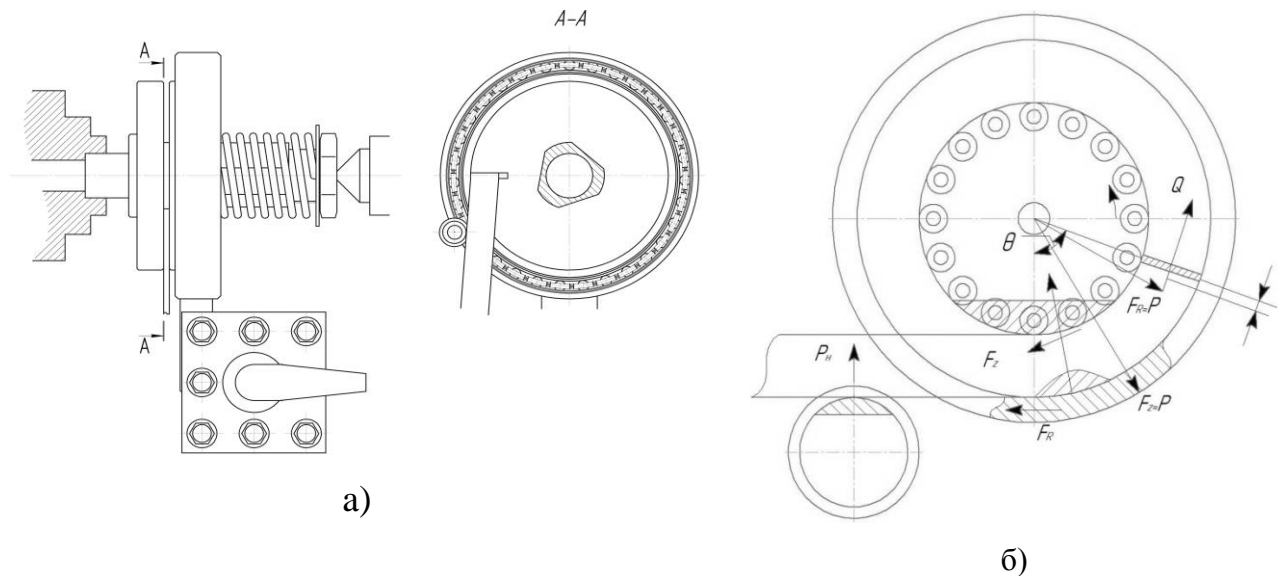


Рис. 2.3. Схеми навівання спіралей шнеків обертовою втулкою:

а) - конструктивна схема навівання спіралей шнеків; б) – розрахункова схема навівання спіралей шнеків

Для практичного використання залежності (2.3) та (2.4) можна спростити і зміну товщини  $h_\rho$  залежно від параметру  $\rho$  можна подати як [27].

$$h_\rho = h_r(\rho) = H_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}. \quad (2.5)$$

Радіус нейтрального шару деформації  $\rho_0$ , згідно [27]

$$\rho_0 = \left( \frac{2\beta r_c}{\sqrt{R} + \sqrt{r}} \right)^2. \quad (2.6)$$

де  $r_c$  - радіус центра ваги січення навитого витка.  $\beta$  - відношення ширини  $B_0 = R - r$  навитої спіралі до ширини стрічки (заготовки),  $\beta = B/B_0 = (R - r)/B$ .

Технологічно ступінь кривини витої стрічки оцінюють відношенням довжини зовнішньої крайки витка до довжини внутрішньої крайки  $\psi$ , яке називають коефіцієнтом нерівномірності витягування [27],  $\psi = R/r$ . Тоді площа січення спіралі буде

$$S_c = \frac{2\beta H_0 r_c (\sqrt{R} - \sqrt{r})}{\sqrt{R} + \sqrt{r}} = \frac{4\beta B_0 H_0 (1 + \psi + \sqrt{\psi})}{3(1 + \psi + 2\sqrt{\psi})}, \quad (2.7)$$

а радіус центра ваги

$$r_c = (R + r + \sqrt{Rr}) / 3. \quad (2.8)$$

Тоді площу січення можна записати як

$$S_c = K_s B_0 H_0, \quad (2.9)$$

де  $K_s$  - коефіцієнт зміни площі січення витка спіралі при навиванні,

$$K_s = \frac{4\beta(1 + \psi + \sqrt{\psi})}{3(1 + \psi + 2\sqrt{\psi})}. \quad (2.10)$$

Відповідно залежність (2.5) прийме вигляд

$$h_\rho = H_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} = \frac{2\beta H_0 (1 + \psi + \sqrt{\psi})}{3(\sqrt{R} + \sqrt{r})\sqrt{\rho}} = \frac{2\beta H_0 (1 + \psi + \sqrt{\psi})(\sqrt{R} + \sqrt{r})}{3(1 + \psi + 2\sqrt{\psi})\sqrt{\rho}}. \quad (2.11)$$

В першому наближенні, зокрема для витків з  $\psi \geq 2,5$ , радіус  $\rho_0$  рівний нейтральному радіусу напружень  $\rho_n$ , ( $\rho_0 = \rho_n = \sqrt{Rr}$ ) [29] залежність (2.11) матиме вид  $h_\rho = H_0 \sqrt{\sqrt{Rr} / \rho_0}$ .

Розглянемо схему згину стрічки на ребро по зовнішньому діаметру обертової пустотілої оправы (матриці), рис. 2.3б. Оскільки розподіл згинних

контактних напружень є складний та важко піддається аналітичному обчисленню, то запишемо баланс робіт.

Виділимо елемент заготовки довжиною  $l_0$ , довжина якого по лінії нейтрального шару деформацій радіусом  $\rho_0$  після навивання не зміниться, і визначається дугою з кутом  $\Theta$ ,  $\Theta = l_0/\rho_0$ . При пластичному деформуванню робота згину елементу стрічки довжиною  $l_0$  буде

$$A_M = M_{зг} \Theta . \quad (2.12)$$

Навивання здійснюється зовнішнім крутним моментом на шпинделі  $M_{нав}$ , який передається через притискну привідну втулку із закріпленим кінцем стрічки, і який створює осьову (тангенціальну) силу  $Q$ , що протягує стрічку через калібр, утворений направляючою та обтискною втулками.

$$M_{нав} = Qr_c . \quad (2.13)$$

Робота зовнішніх сил

$$A_Q = Ql . \quad (2.14)$$

Момент згину  $M_{зг}$  визначається парою сил  $P$  згину прикладених до стрічки від дії направляючої втулки ( $P_r$ ) та формуючої втулки ( $P_R$ ), які  $P_R \approx P_r \approx P$ . Ці сили направлені перпендикулярно до зовнішньої та внутрішньої крайок в зоні деформації і мають складові сили тертя  $\mu P$ . По зовнішній крайці обтиск проводиться пустотілою формувальною втулкою, встановленою з можливістю вільного обертання, а тому сили тертя, в основному, локалізуються по направляючій втулці, що контактує з внутрішньою крайкою спіралі і визначаються радіальним параметром  $r$ .

Відповідно робота сил тертя ковзання по направляючій втулці

$$A_m = k_p \mu r P \Theta . \quad (2.15)$$

де  $k_P$  - коефіцієнт приведення радіального параметру сил тертя.

Спіраль при формоутворенні підтискається осьюою притискною привідною втулкою із силою  $F_z$ , яку технологічно приймають пропорційно силі  $P$  шляхом вибору притискних пружин.

$$F_z = k_z P = \frac{k_z M_{32}}{l_P}, \quad (2.16)$$

де  $k_F$  – коефіцієнт пропорційності призначення сили осьового притиску.

Тоді робота сил на подолання сил опору від тертя до притискної дії втулки

$$A_{on} = \mu r_F F_z \Theta, \quad (2.17)$$

де  $r_F$  - радіальний параметр (плече) прикладання сили  $F_z$ ,  $r_F = k_F r$ .

Оскільки притискання витої стрічки проходить в зоні із найбільшою товщиною, тобто по внутрішній крайці спіралі, то приймаємо радіальний параметр  $r_F$  рівним радіусу внутрішньої крайки витка  $r$ , тобто  $k_F \approx 1$ .

Сила  $Q$ , що втягує стрічку в зону згину, одночасно буде її розтягувати на величину  $\Delta l = \varepsilon l$ , де  $\varepsilon$  - відносне видовження стрічки,  $\varepsilon = r_c / \rho_0 - 1$ .

Робота, що витрачається на розтяг стрічки при її навиванні визначається, як

$$A_\tau = Q \varepsilon l. \quad (2.18)$$

Тоді рівняння балансу робіт при навиванні прийме вигляд

$$Ql = M_{32} \theta + k_P \mu r P \theta + k_F \mu r F \theta + \varepsilon Ql. \quad (2.19)$$

Звідти, з врахуванням того, що  $l = \rho_0 l \approx r_c \theta$

$$Q = \frac{M_{32} + \mu r P (k_P + k_F k_z)}{(1 - \varepsilon) r_c}. \quad (2.20)$$

Розглянемо складові залежності (2.20). Момент згину, згідно [27], визначають за залежністю

$$M_{32} = \frac{\beta H_0 (R^2 + 2r\sqrt{rR} - 3rR)}{3} \left( \sigma_{TO} + \Pi \ln \sqrt{\frac{R}{r}} \right) \sqrt{\frac{R}{r}}. \quad (2.21)$$

На рис. 2.4 відображено зміну залежності моменту навивання (згину)  $M_{32}$  на ребро стрічки із матеріалу сталь Ст 3 постійної ширини  $B_0$  та товщини  $H_0$  заготовки від зовнішнього радіуса спіралі (радіуса пустотілої формувальної втулки)  $R$ .

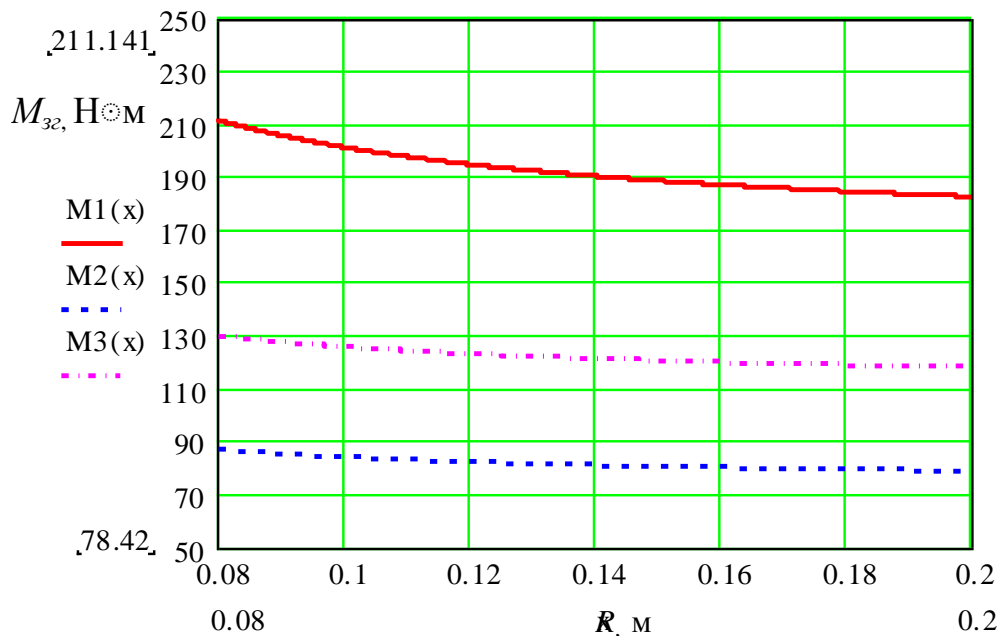


Рис. 2.4. Зміна моменту навивання  $M_{32}$  від зовнішнього радіуса спіралі ( $x \equiv R$ ) при: 1 -  $H_0 = 2$  мм,  $B_0 = 30$  мм – суцільна лінія; 2 -  $H_0 = 3$  мм,  $B_0 = 20$  мм – штрих-пунктирна лінія; 3 -  $H_0 = 2$  мм,  $B_0 = 20$  мм – штрихова лінія

На рис. 2.5 наведено зміну залежності моменту згину  $M_{32}$  від ширини заготовки  $B_0$  із матеріалу сталь Ст 3 при навиванні у пустотілій формувальній втулці зовнішнім діаметром від 100 до 300 мм, із калібруванням по зовнішньому діаметру витків. На рис. 2.6 показано зміну залежності моменту

згину від ширини заготовки  $B_0$  із матеріалу сталь Ст 3 при навиванні із калібруванням по внутрішньому діаметру витків.

$$R^2 + 2r\sqrt{rR} - 3rR = (R - r)^2 - (\sqrt{rR} - r)^2.$$

Враховуючи те, що маємо

$$R^2 + 2r\sqrt{rR} - 3rR = B_0^2 \left[ 1 - \frac{1}{(\sqrt{R/r} + 1)^2} \right] = B_0^2 \frac{\sqrt{\psi}(\sqrt{\psi} + 2)}{(\sqrt{\psi} + 1)^2}. \quad (2.22)$$

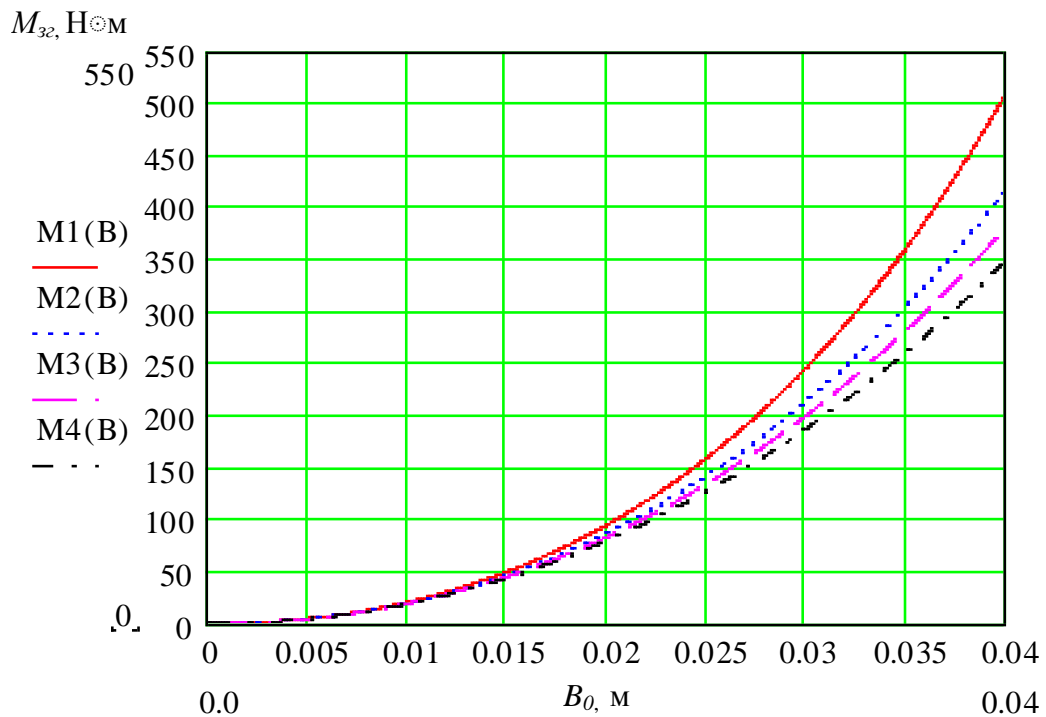


Рис. 2.5. Зміна моменту навивання  $M_{3z}$  від ширини заготовки  $B_0$  обертовою втулкою при навиванні витків із зовнішніми радіусами: 1 -  $R = 50$  мм, – суцільна лінія; 2 -  $R = 75$  мм – точкова лінія; 3 -  $R = 100$  мм – штрихова лінія; 4 -  $R = 150$  мм – штрих-пунктирна лінія

Відповідно, залежність (2.21) прийме вид

$$M_{3z} = \beta B_0^2 H_0 \frac{\sqrt[4]{\psi}(\sqrt{\psi} + 2)}{3(\sqrt{\psi} + 1)^2} (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi}), \quad (2.23)$$

де  $\psi$  - коефіцієнт нерівномірності витягування.

Залежність (2.23) можна записати у вигляді

$$M_{зз} = \frac{K_M \beta B_0^2 H_0}{4} (\sigma_{T0} + \Gamma \ln \sqrt{\psi}) , \quad (2.24)$$

де  $K_M$  - параметр впливу кривини згину на момент згину.

$$K_M = \frac{4(\sqrt{\psi} + 2)^4 \sqrt{\psi}}{3(\sqrt{\psi} + 1)^2} . \quad (2.25)$$

Величину (2.25) можна апроксимувати залежністю

$$K_M = \psi^{-0,1} . \quad (2.25,a)$$

Відповідно, залежність (2.23) запишемо у вигляді

$$M_{зз} = \frac{\beta B_0^2 H_0}{4 \psi^{0,1}} (\sigma_{T0} + \Gamma \ln \sqrt{\psi}) . \quad (2.26)$$

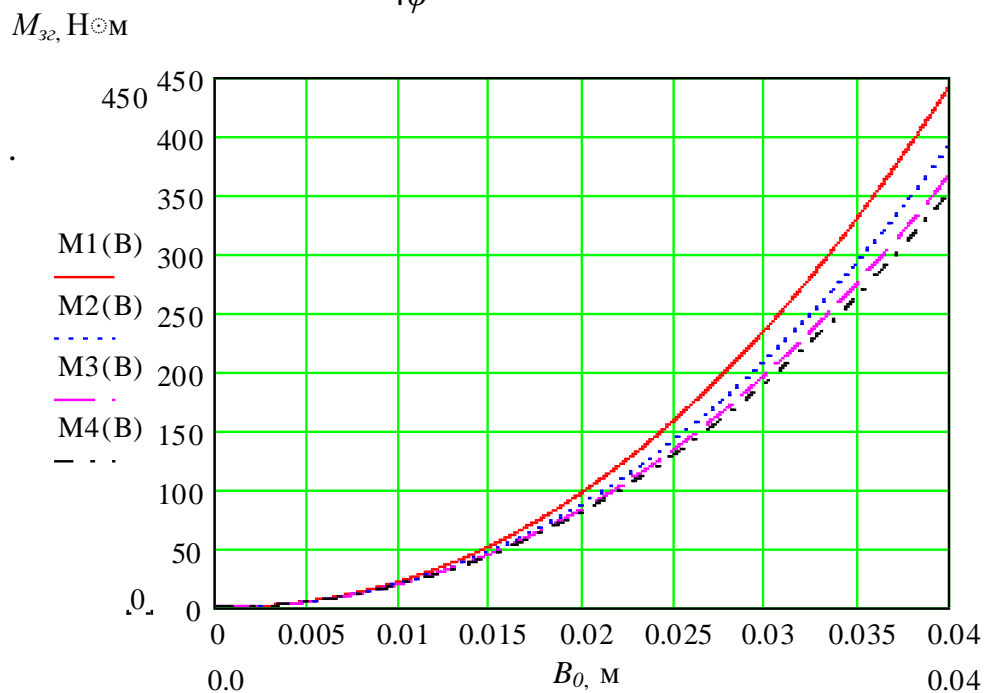


Рис. 2.6. Зміна моменту навивання  $M_{зз}$  від ширини заготовки  $B_0$  при навиванні витків із внутрішніми радіусами: 1 -  $r=25$  мм – суцільна лінія; 2 -  $r=50$  мм – точкова лінія; 3 -  $r=75$  мм – штрихова лінія; 4 -  $r=100$  мм – штрих-пунктирна лінія

На графіку (рис. 2.7 ) наведено зміну моменту згину за розрахунковою залежністю (2.24) та приблизною (2.25,а) з апроксимованим значенням  $K_M$  , звідки впливає правомірність такого спрощення.

Сили згину  $P$  , пара яких створює момент згину, залежать від довжини плеча між ними і рівна

$$P = M_{зг} / l_P. \quad (2.27)$$

Величина плеча залежить від конструктивного виконання пристосування для навивання спіралі. При відсутності початкових зазорів між стрічкою та зовнішньою і внутрішньою робочими поверхнями втулок, що утворюють калібр для стрічки довжина плеча визначається через коефіцієнт зменшення ширини (усадки).

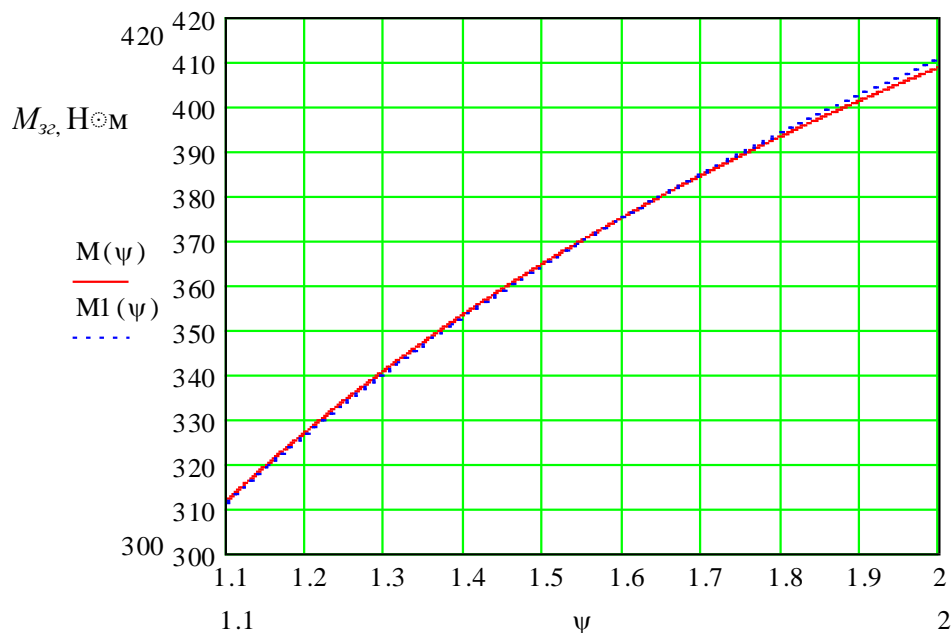


Рис. 2.7. Залежність зміни моменту згину з апроксимованим значенням  $K_M$

Із врахуванням незначної усадки стрічки порівняно із розмірами обтискної втулки, прийmemo

$$l_{P\min} = \sqrt{2(1 - \beta) B_0 R}. \quad (2.28)$$

В загальному випадку



$$l_p = k_l \sqrt{2(1-\beta)B_0 R}, \quad (2.29)$$

де  $k_l$ - коефіцієнт впливу технологічних зазорів між шириною стрічки та калібру.

Силу притиску приймається пропорційно до сил згину, що забезпечується технологічно вибором притискних пружин.

$$F_z = k_z P = \frac{k_z M_{3z}}{l_p}. \quad (2.30)$$

Із врахування (2.30) зв'язок між силою втягування спіралі в робочу зону навівання та моментом згину буде

$$Q = \frac{M_{3z} [1 + \mu(k_\mu + k_z k_F)]}{r_c (1 - \varepsilon)} = K_Q \frac{M_{3z}}{r_c}, \quad (2.31)$$

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

Відповідно, момент навівання на привідній оправці із закріпленим кінцем спіралі і, відповідно на шпинделі верстату

$$M_{нав} = r_c Q = K_Q M_{3z} = K_\Sigma H_0 B_0^2 (\sigma_{T0} + \Pi \ln \psi), \quad (2.32)$$

де  $K_\Sigma$  - комплексний коефіцієнт, що залежить від довжини плеча прикладання сил та умов навівання

$$K_\Sigma = 0,25 \beta K_M K_Q = \frac{\beta K_M [1 + \mu k_\mu (k_P + k_\varepsilon k)]}{4(1 - \varepsilon)} \approx \frac{\beta [1 + \mu k_\mu (k_P + k_\varepsilon k)]}{4(1 - \varepsilon) \psi^{0,1}}. \quad (2.33)$$

Допустиме значення коефіцієнту нерівномірності витягування визначається пластичністю матеріалу

$$\psi_{дон} = (1 + 2\delta_5)^2. \quad (2.34)$$

де  $\delta_5$  - відносне видовження матеріалу при стандартному випробовуванні.

Потужність навивання на шпинделі верстату із врахуванням (2.32)

$$N_n = K_Q M_{3z} \omega, \quad (2.35)$$

де  $\omega$  - кутова швидкість обертання шпинделя верстату із привідною оправкою.

Після навивання та вивільнення з пристосування суцільного пакету проходить пружне його розкручування внаслідок приведення напружено-деформівного стану до рівноваги і, як наслідок певне збільшення діаметральних розмірів витків.

При навиванні стрічки чистим моментом згину зміна кривизни шару, що проходить через центру мас січень витків, згідно [31] буде

$$\Delta K = \frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_{cr}} = \frac{M_{3z}}{EI}, \quad (2.36)$$

де  $I$  - момент інерції площі поперечного січення спіралі

$$I = k_I \frac{H_0 B_0^2}{12}, \quad (2.37)$$

$k_I$  - коефіцієнт зміни моменту інерції січення витка внаслідок зменшення площі січення спіралі, порівняно із площею січення заготовки.

У випадку дії розтягуючої складової

$$\Delta K = \frac{M_{3z} (1 - K_{роз})}{EI}. \quad (2.38)$$

Відповідно

$$\Delta K = \frac{\beta H_0 B_0^2 (1 - K_{роз}) (\sigma_{T0} + \Pi \ln \sqrt{\psi})}{4EI \psi^{0,1}}. \quad (2.39)$$

В цьому випадку радіус центра січення розвантаженої спіралі збільшиться, порівняно із радіусом нерозвантаженого пакету витків на величину  $\Delta r_c$

$$\Delta r_c = r_{cr} - r_c = \frac{r_c^2 \Delta K}{1 + r_c \Delta K}. \quad (2.40)$$

Оскільки при розвантаженні відбувається тільки пружна деформація, то форма січення практично не змінюється і, відповідно, на величину  $\Delta r_c$  збільшується не тільки радіус центрів ваги січень, але і його зовнішній і внутрішній радіуси витків.

Відповідно зовнішній діаметр навитого пакету буде  $D_g = 2(R + \Delta r_c)$ , а внутрішній -  $d_g = D_g - 2\beta B_0$ .

Зовнішній діаметр пакету зв'язаний із параметрами спіралі експериментальною залежністю, наведеною в [29]

Відповідно, діаметр формоутворюючої поверхні обтискної втулки буде

$$D_o = d_g + 2B_0 - 2\Delta r_c = \left(1 - \frac{k_T T}{d}\right) \left(\frac{D - d}{\psi - 1}\right) + 2B_0 - \frac{2r_c^2 \Delta K}{1 + r_c \Delta K}. \quad (2.41)$$

Радіус нейтральної поверхні деформацій можна представити через коефіцієнт нерівномірності деформації  $\rho_n = r\sqrt{\psi}$ . Враховуючи те, що  $B = r(\psi - 1)$ , радіус нейтральної поверхні напружень виразимо через коефіцієнт нерівномірності деформацій

$$\rho_n = \frac{B\sqrt{\psi}}{\psi - 1}. \quad (2.42)$$

і відповідно, кривина  $\kappa_g$  нейтральної поверхні напружень стрічки шириною  $B_0$ , навитої у виток із коефіцієнтом нерівномірності деформацій  $\psi$  буде

$$\kappa_{\epsilon} = \frac{1}{\rho_n} = \frac{\psi_i - 1}{B_0 \sqrt{\psi_i}}. \quad (2.43)$$

Із (2.43) отримуємо залежність коефіцієнту нерівномірності деформацій  $\psi$  від радіусу нейтральної поверхні напружень та її кривини  $\kappa_{\epsilon}$ .

$$\psi = \frac{B_0^2}{4\rho_n^2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4\rho_n^2}{B_0^2}} \right)^2. \quad (2.44) \quad \psi = \frac{\kappa_{\epsilon}^2 B_0^2}{4} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4}{\kappa_{\epsilon}^2 B_0^2}} \right)^2. \quad (2.45)$$

При навиванні із підтримуючими роликами, процес навивання розбивається на етапи гнуття стрічки на ребро на кожному ролику. Прийmemo, що загальна робота затрачена на пластичну деформацію при навиванні стрічки не залежить від розбиття на окремі етапи зміни її форми.

Тоді робота на навивання елементарної довжини витка  $dl$  із кінцевими параметрами  $R$  та  $r$  і, відповідно, радіусом кривини  $\kappa_{\epsilon}$  витка, нейтрального шару напружень  $\rho_n$  та відповідним коефіцієнтом нерівномірності деформацій  $\psi$  буде

$$dA = M_{3z} d\theta = M_{3z} \kappa_{\epsilon} dl. \quad (2.46)$$

Прийmemo, що гнуття проходить на  $n$  робочих роликах. Баланс робіт буде

$$dA = dA_1 + dA_2 + \dots + dA_i + \dots + dA_n. \quad (2.46,a)$$

Залежність розписується, як

$$M_{3z} \kappa_{\epsilon} = M_1 \Delta \kappa_1 + M_2 \Delta \kappa_2 + \dots + M_i \Delta \kappa_i + \dots + M_n \Delta \kappa_n. \quad (2.47)$$

де  $\Delta\kappa_i$  - приріст кривини, що забезпечується при формування стрічки на  $i$ -тому ролику;  $M_i$  - моменти формоутворення гнutoго профілю на кожному ролику.

Із (2.47) визначаємо сумарне значення моменту згину

$$M_{зг} = \sum_{i=1}^n M_i(\kappa_i) \Delta\kappa_i / \kappa_g. \quad (2.48)$$

Розподіл навантаження на формоутворюючі ролики залежить від конструктивного виконання пристосування, зокрема від технологічних зазорів між стрічкою і калібром, утвореним поверхнями оправы та роликів. Проте основний процес формоутворення (до 70-90 відсотків формування кривини профілю) припадає на перший ролик, де здійснюється згин на ребро, та другий і третій ролики, що догніють стрічку. Інші ролики забезпечують передачу сили розтягу  $Q$ , яке забезпечує протягування стрічки до зони формування. Радіальне навантаження  $P_n$  на них визначається залежно від  $Q$  та кутового зміщення  $\gamma$  роликів один від другого.

$$P_n = 2Q \sin \gamma. \quad (2.49)$$

Згинні  $M_i$  моменти на перших роликах визначають залежно від доли формування профілю на кожному з них на основі залежностей (2.47), (2.26), а осьову силу  $Q$  - за залежністю (2.31).

Момент навивання та потужність на привідній оправці із закріпленим кінцем спіралі і, відповідно на шпинделі верстату визначаються за залежностями (2.33), (2,35).

### 2.3. Дослідження силових параметрів процесу формоутворення секційних гнучких гвинтових елементів різного профілю

Вирішення наукової проблеми проектування і виготовлення гвинтових робочих органів сільськогосподарських машин, що відповідає сучасним вимогам за продуктивністю, матеріало- та енергоємністю з високими техніко-економічними можливостями є важливим завданням.

Серед гвинтових робочих органів важливе місце займають різнопрофільні гвинтові елементи, які широко використовуються в багатьох конструкціях транспортно-технологічних механізмів, таких як змішувачі, подрібнювачі, затискні пристрої, гвинтові сепаратори, очисники та інші в агропромисловому комплексі.

Розглянемо процес навивання стрічки на оправу складного профілю в поперечному перерізі, що заданий в параметричному виді  $x=x(\theta_1)$ ,  $y=y(\theta_1)$ , розрахункова схема якого представлено на рис. 2.8, де  $\theta_1$  - кутовий параметр, що визначає кут повороту оправы, рад.

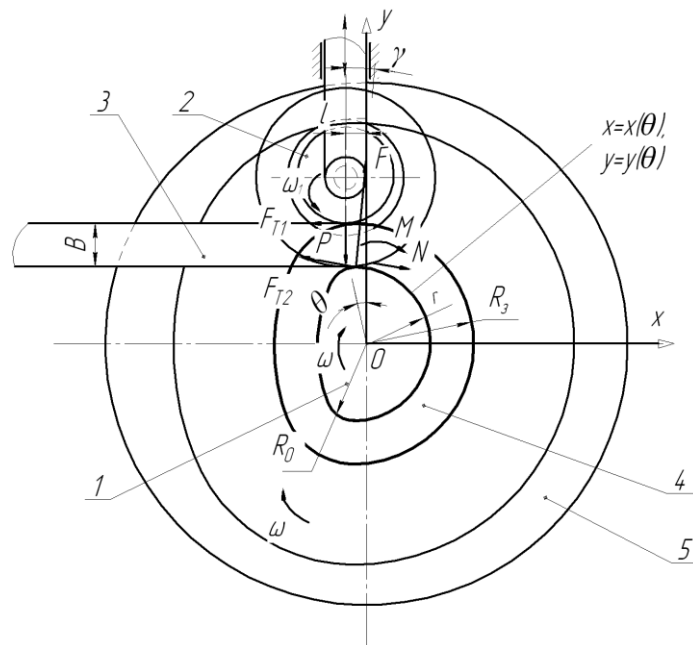


Рис. 2.8. Розрахункова схема процесу навивання стрічки на оправу складного профілю: 1 –оправа складного профілю; 2 – притискний ролик; 3 –стрічка; 4 – профільний гвинтовий елемент; 5 -торцевий кулачок, форма якого відповідає еквідістанті оправы 1

В процесі навивання відбувається стиснення волокон стрічки на внутрішньому діаметрі і розтяг волокон стрічки на зовнішньому діаметрі гвинтового профільного елемента. Визначимо момент згину стрічки в цих зонах, розглянувши процес деформації стрічки в гарячому та холодному стані.

Як відомо, радіальні напруження, що виникають у зоні розтягу ребра стрічки визначаються за формулою [119]:

$$\sigma_{\rho 1} = -\beta \sigma_s \cdot \ln \frac{R}{\rho}, \quad (2.50)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження, дорівнює 1,15;

$\sigma_s$  – границя текучості матеріалу профільного гвинтового елемента, МПа;

$R$  – зовнішній радіус гнугтя, мм;

$\rho$  - полярна координата радіуса гнугтя, мм.

Аналогічно визначаємо радіальні напруження в зоні стиску [119]:

$$\sigma_{\rho 2} = -\beta \sigma_s \cdot \ln \frac{\rho}{r}, \quad (2.51)$$

де  $r$  – внутрішній радіус гнугтя, мм.

Тангенціальні напруження в зоні розтягу:

$$\sigma_{\theta 1} = \beta \sigma_s \cdot \left( 1 - \ln \frac{R}{\rho} \right). \quad (2.52)$$

Тангенціальні напруження в зоні стиску:

$$\sigma_{\theta 2} = -\beta \sigma_s \cdot \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r} \right). \quad (2.53)$$

Особливістю навивання профільних гвинтових елементів є те, що радіуси кривизни, а відповідно і радіуси гнуття стрічки є змінними протягом одного оберту оправи складного профілю. Тому внутрішній радіус гнуття заготовки  $r_2$  можна визначити на основі рівняння радіуса кривизни профілю оправи [27] за формулою:

$$r_2 = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}}{\ddot{x}\dot{y} - \dot{x}\ddot{y}}. \quad (2.54)$$

Відповідно зовнішній радіус  $R$  гнуття стрічки можна визначити за формулою:

$$R = r_2 + \beta_y B_0, \quad (2.55)$$

де  $\beta_y$  - коефіцієнт усадки стрічки під час навивання,

$B_0$  – ширина ребра стрічки, мм.

Момент гнуття стрічки визначаємо за формулою:

$$M_1 = \left( \int_{\rho_n}^R \sigma_{\theta 1} \rho d\rho + \int_{r_2}^{\rho_n} \sigma_{\theta 2} \rho d\rho \right) H_0, \quad (2.56)$$

де  $\rho_n$  - радіус нейтральної поверхні напружень, мм;

$H_0$  – товщина ребра профільної стрічки, мм.

Радіус нейтральної поверхні напружень визначаємо за формулою [1]:

$$\rho_n = \sqrt{Rr_2}. \quad (2.57)$$

Підставляючи формули (2.52), (2.53) у формулу (2.56), враховуючи формулу (2.57), знаходимо:



$$M_1 = \beta \sigma_s \frac{H_0 \beta_y^2 B_0^2}{4}. \quad (2.58)$$

У випадку навивання стрічки на оправу складного профілю в холодному стані відбувається зміцнення матеріалу стрічки, причому величини тангенціальних напружень для стрічки визначаються за формулами [119]:

- в зоні розтягу:

$$\sigma_{\theta 1} = \beta \left[ \sigma_{TO} \left( 1 - \ln \frac{R}{\rho} \right) + \frac{\Pi}{2} \left( 2 \ln \frac{\rho}{\rho_H} - \ln \frac{\rho R}{\rho_H^2} \ln \frac{R}{\rho} \right) \right]; \quad (2.59)$$

- в зоні стиску:

$$\sigma_{\theta 2} = -\beta \left[ \sigma_{TO} \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r_2} \right) + \frac{\Pi}{2} \left( 2 \ln \frac{\rho_H}{\rho} + \ln \frac{\rho_H^2}{\rho r_2} \ln \frac{\rho}{r_2} \right) \right], \quad (2.60)$$

де  $\sigma_{T.0}$  - екстрапольована границя текучості матеріалу стрічки, МПа;

$\Pi$  - лінійний модуль зміцнення матеріалу стрічки, МПа.

Підставляючи рівняння (2.59), (2.60) у рівняння (2.56), після інтегрування та скорочень знаходимо момент гнуття стрічки:

$$M_1 = \beta H_0 \left[ \sigma_{TO} \frac{\beta_y^2 B_0^2}{4} + \Pi \left( \frac{2r_2^2 + 2r_2 \beta_y B_0 + \beta_y^2 B_0^2}{4} \cdot \ln \sqrt{1 + \frac{\beta_y B_0}{r_2}} - \frac{2r_2 \beta_y B_0 + \beta_y^2 B_0^2}{8} \right) \right]. \quad (2.61)$$

На основі формул (2.56) та (2.61) робимо висновок, що в процесі навивання стрічки на оправу складного профілю в холодному стані відбувається зміна моменту гнуття стрічки від кута повороту оправы. Згідно розрахункової схеми на рис. 2.8 рівняння рівноваги частини стрічки, що піддається деформації запишемо таким чином [29]:

$$\begin{aligned}
 &\text{по осі } x: -F_{T1} - F_{T2} \cdot \cos \gamma + N \cdot \cos \gamma + F \cdot \sin \gamma = 0; \\
 &\text{по осі } y: -P_1 + F_{T2} \cdot \sin \gamma - N \cdot \sin \gamma + F \cdot \cos \gamma = 0; \\
 &\text{сума моментів: } P_1 \cdot l_1 + F_{T1} \cdot R_3 + F_{T2} \cdot R_0 - N \cdot \rho_n - M = 0,
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} &\text{по осі } x: -F_{T1} - F_{T2} \cdot \cos \gamma + N \cdot \cos \gamma + F \cdot \sin \gamma = 0; \\ &\text{по осі } y: -P_1 + F_{T2} \cdot \sin \gamma - N \cdot \sin \gamma + F \cdot \cos \gamma = 0; \\ &\text{сума моментів: } P_1 \cdot l_1 + F_{T1} \cdot R_3 + F_{T2} \cdot R_0 - N \cdot \rho_n - M = 0, \end{aligned}} \right\} (2.62)$$

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

$F_{T2}$  - сила тертя між стрічкою та оправою складного профілю, Н;

$\gamma$  - 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;

$R_3$  - зовнішній радіус взаємодії гвинтового елемента відносно центра обертання оправи, мм;

$R_0$  - відстань від центра обертання оправи до її поверхні, мм.

Сили тертя визначаємо за залежностями:

$$F_{T1} = \mu_1 \cdot P_1; \quad (2.63)$$

$$F_{T2} = \mu_2 \cdot F, \quad (2.64)$$

де  $\mu_1$  - коефіцієнт тертя між притискним роликом та стрічкою;

$\mu_2$  - коефіцієнт тертя між оправою та гвинтовим елементом.

Рівнодіючу нормальних контактних напружень знаходимо за формулою:

$$F = \sigma_r \cdot H_0 \cdot L, \quad (2.65)$$

де  $\sigma_r$  - контактні нормальні напруження на внутрішньому радіусу гвинтового елемента, МПа;

$L$  - довжина контакту по внутрішньому діаметру гвинтового елемента, мм.

При відомому моменті гнуптя  $M$  можна знайти усі сили, що виникають в процесі навивання, розв'язавши систему рівнянь (2.62). В даному випадку:

$$F = \frac{-P_1 \cdot (\mu_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma - 1)}{\mu_2 \cdot \sin \gamma + \operatorname{tg} \gamma \cdot (-\mu_2 \cdot \cos \gamma + \sin \gamma) + \cos \gamma}; \quad (2.66)$$

$$N = \frac{\mu_1 \cdot P_1 + F \cdot (\mu_2 \cdot \cos \gamma + \sin \gamma)}{\cos \gamma}. \quad (2.67)$$

Експериментальні дослідження показали, що максимальна сила гнуптя  $P_1$  притискним роликом виникає на початковій стадії деформування, тобто, коли кут  $\gamma$  рівний нулю. Тому, для спрощення розрахунків, розв'язок системи рівнянь (2.62) буде наступним:

$$P_1 = F; \quad (2.68)$$

$$N = (\mu_1 + \mu_2) \cdot P_1; \quad (2.69)$$

$$P = \frac{M}{l_1 + \mu_1 R_3 + \mu_2 R_0}. \quad (2.70)$$

Відстань від центра обертання оправи до її поверхні визначаємо за формулою:

$$R_0 = \sqrt{x(\theta_1)^2 + y(\theta_1)^2}. \quad (2.71)$$

Зовнішній радіус взаємодії гвинтового елемента відносно центра обертання оправи визначаємо за формулою [29]:

$$R_3 = \sqrt{(x(\theta_1) + B_0)^2 + (y(\theta) + B_0)^2}. \quad (2.72)$$

Слід зауважити, що тут коефіцієнт тертя  $\mu_1$  між притискним роликком і стрічкою є величиною приведеною і не відповідає безпосередньому значенню коефіцієнта тертя для контактуючих матеріалів. Момент, який необхідно прикласти для обертання оправки складного профілю, залежить від конструктивних особливостей оправ і в загальному випадку визначається згідно рис. 2.8 за залежністю:

$$M_O = k_M \cdot P_1 \cdot (l_1 + \mu_1 \cdot R_3), \quad (2.73)$$

де  $k_M$  – коефіцієнт, що враховує конструктивні виконання оправки.

На основі приведених вище формул можна проектувати необхідне технологічне оснащення. При цьому, для зменшення моменту обертання оправки, а отже, і зменшення необхідної потужності навівання гвинтових заготовок, потрібно звести до мінімуму коефіцієнт тертя  $\mu_1$ , наприклад, використовуючи змащувальні речовини.

Як приклад розрахунку розглянемо процес навівання стрічки на оправку складного профілю (рис. 2.8), рівняння якого задано в параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} x(\theta) &= (R_1 - d_1) \cos \theta + d_1 \cos^2 \theta_1, \\ y(\theta) &= R_1 \sin \theta_1, \end{aligned} \quad (2.74)$$

де  $R_1$  – максимальний радіус оправки складного профілю, мм;

$d_1$  – параметр, що визначає відхилення профілю оправки, мм.

Гвинтові елементи заданого вище профілю можуть використовуватись для змішування матеріалів спареними шнеками.

Для параметричного рівняння (2.74) встановлюємо наступні залежності:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= -(R_1 - d_1) \sin \theta_1 - 2d_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1; \\
 \dot{y} &= R_1 \cos \theta_1; \\
 \ddot{x} &= -(R_1 - d_1) \cos \theta_1 + 2d_1 (\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1); \\
 \ddot{y} &= -R_1 \sin \theta_1.
 \end{aligned}
 \tag{2.75}$$

Підставляючи рівняння (2.74) у рівняння (2.54), одержуємо:

$$r = \frac{\left[ \left( (-R_1 + d_1) \sin \theta_1 - 2d_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \right)^2 + R_1^2 \cos^2 \theta_1 \right]^{\frac{3}{2}}}{\left( (-R_1 + d_1) \sin \theta_1 - 2d_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \right) (-R_1 \sin \theta_1) - \left( (-R_1 + d_1) \cos \theta_1 + 2d_1 (\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1) \right) R_1 \cos \theta_1}
 \tag{2.76}$$

Рівняння (2.76) підставляємо в залежності (2.61), (2.70) та (2.73) та одержуємо результати силових параметрів формування гвинтових елементів складного профілю, що заданий параметричним рівнянням (2.74).

Розрахунки виведених залежностей виконували за допомогою пакету прикладних програм для ПК. За результатами розрахунків побудовано графіки залежності радіуса кривизни складного профілю оправи від кутового параметру (рис. 2.9) та залежності зусилля гнуття і крутного моменту від кута повороту оправи складного профілю (рис. 2.10-2.11).

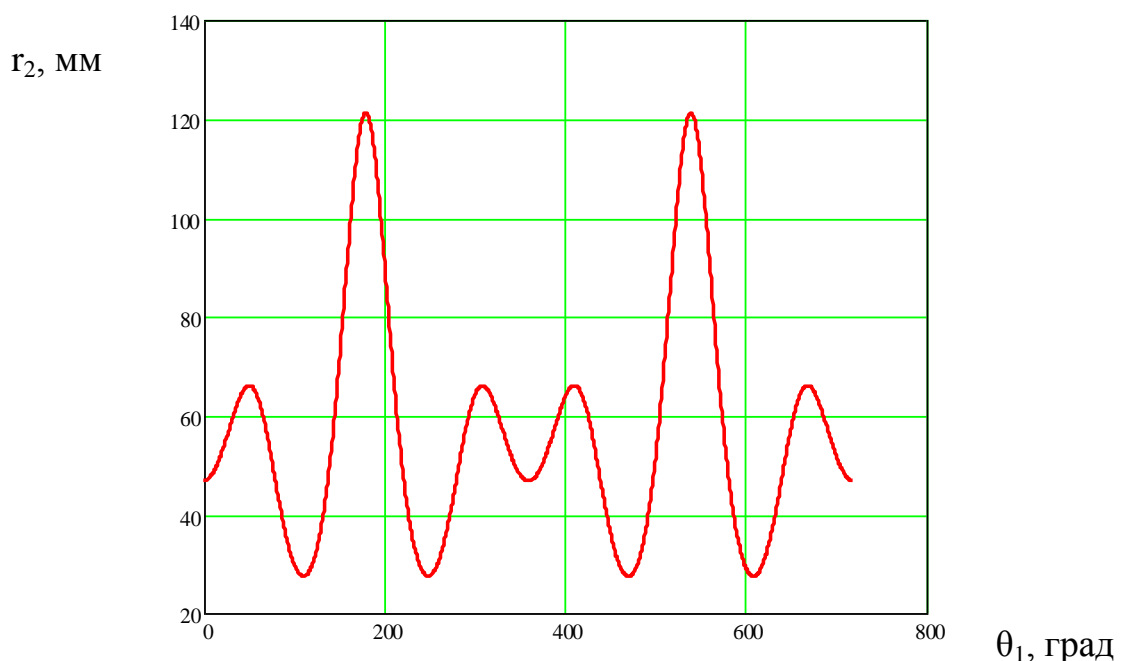


Рис. 2.9. Графіки залежності радіуса кривизни складного профілю оправи від кутового параметру  $R_1=50\text{мм}$ ;  $d_1=15\text{мм}$

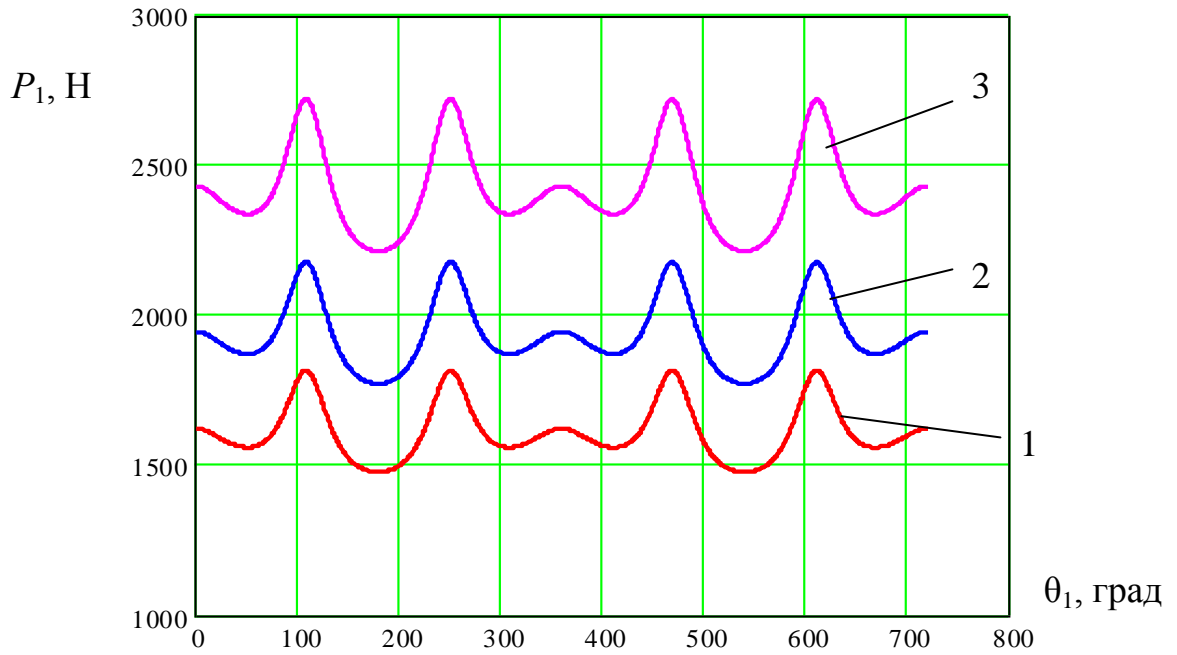


Рис. 2.10. Графіки залежності сили гнущтя притискним роликком від кута повороту оправы складного профілю (Ст 3,  $\sigma_B=440\text{МПа}$ )  $B_0=15\text{мм}$ ;  $R_I=50\text{мм}$ ;  $d_1=15\text{мм}$ : 1 –  $H_0=1\text{мм}$ ; 2 –  $H_0=1,2\text{мм}$ ; 3 –  $H_0=1,5\text{мм}$

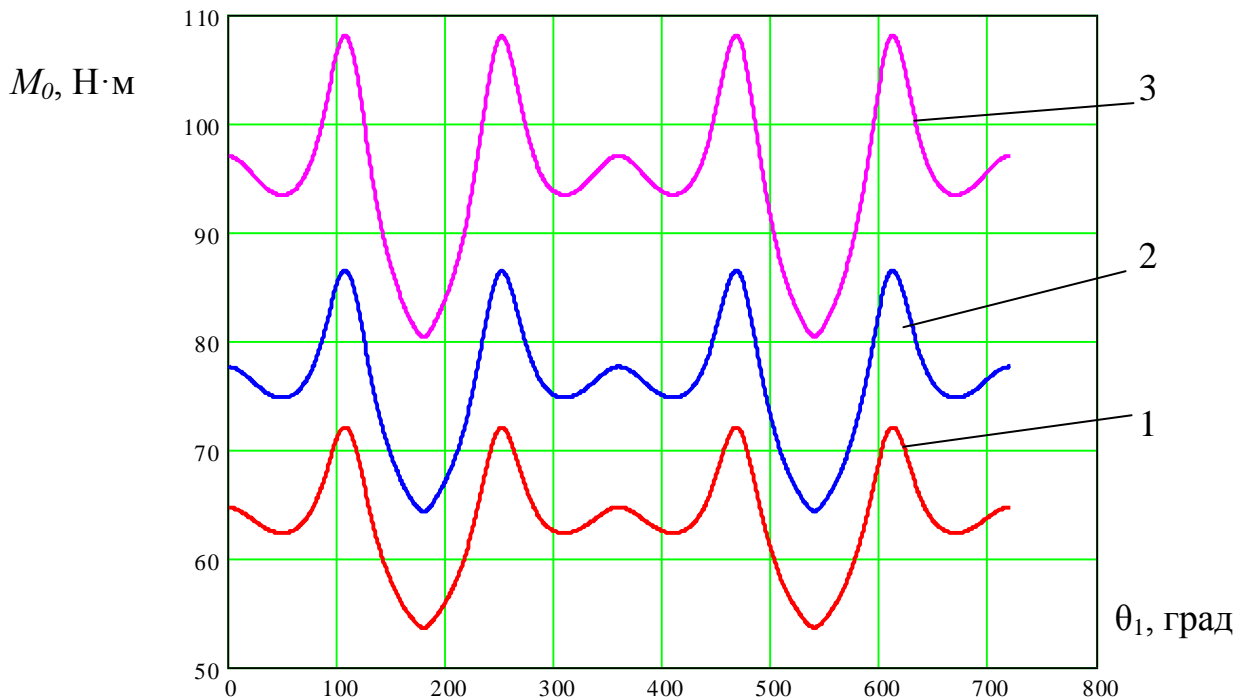


Рис. 2.11. Графіки залежності моменту, який необхідно прикласти для обертання оправы складного профілю від кута повороту оправы (Ст 3,  $\sigma_B=440\text{МПа}$ )  $B_0=15\text{мм}$ ;  $R_I=50\text{мм}$ ;  $d_1=15\text{мм}$ : 1 –  $H_0=1\text{мм}$ ; 2 –  $H_0=1,2\text{мм}$ ; 3 –  $H_0=1,5\text{мм}$

З графічних залежностей рис. 2.10—2.11 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 оправи  $M_0 = 55 - 72$  Н·м, при  $H_0 = 1,5$  мм сила гнуття знаходиться в межах  $P_1 = 2200 - 2700$  Н, а момент  $M_0 = 80 - 108$  Н·м. Зусилля і момент формоутворення набувають максимального значення в процесі формування заготовки на частині оправи із найменшим радіусом кривизни, тобто в даному випадку при 105 та 250 градусах, найменші значення досягаються при 180 градусах, коли радіус гнуття є найбільшим. Ці параметри повторюються періодично із періодом  $2\pi$ .

## **2.4. Дослідження динаміки процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок**

### **2.4.1. Дослідження силових параметрів процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок**

Розглянемо процес калібрування витка гвинтової заготовки на крок (рис. 2.12). З умови рівноваги сил та встановленого процесу калібрування із врахування сил тертя на обох поверхнях клина визначаємо необхідний крутний момент на приводі для здійснення калібрування:

$$M_{кр} = Q \frac{D}{2}, \quad (2.77)$$

де  $Q$  – сила подачі клина, Н;

$D$  – зовнішній діаметр заготовки до калібрування, мм.

Силу подачі клина знаходимо із залежності:

$$Q = P + F_1, \quad (2.78)$$

де  $P$  – радіальна сила на похилій частині клина, Н;

$F_1$  – сила тертя на вертикальній частині клина, Н.

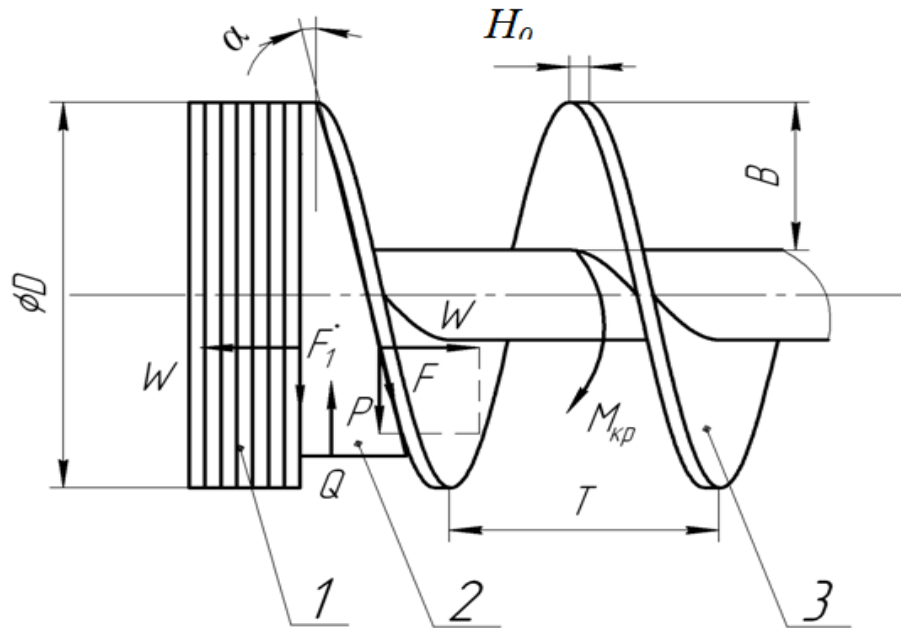


Рис. 2.12. Розрахункова схема пристосування для калібрування витка гвинтової заготовки на крок: 1 – щільно навита заготовка, 2 – клин; 3 – калібровані витки гвинтової заготовки

Радіальна сила на похилій частині клина:

$$P = W \operatorname{tg}(\alpha + \varphi), \quad (2.79)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу клина, град;

$\varphi$  – кут тертя на похилій площині клина, град;

$W$  - осьова сила деформації витків, Н.

Сила тертя на вертикальній частині клина

$$F_1 = W \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (2.80)$$

де  $\varphi_1$  – кут тертя на вертикальній площині клина, град.

Тоді

$$Q = W [\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1]. \quad (2.81)$$

Осьову силу деформації витків знаходимо за формулою:

$$W = \frac{2M_{32}}{D}, \quad (2.82)$$

де  $M_{32}$  - момент розгинання витка, Н·мм.



Процес розгинання витка можна розглядати як згин широкої стрічки. Напружено-деформований стан в цих місцях представлений як об'ємний стан напружень та плоский стан деформацій. Згідно рисунка 2.12, враховуючи постійність внутрішнього радіуса згину  $r_1$  стрічки по всій ширині гвинтової заготовки, використовуємо полярну систему координат із полюсом, що співпадає із центром радіуса  $r_1$  в даний момент деформування. Рівняння рівноваги прийме вид [119]:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0, \quad (2.83)$$

де  $\sigma_\rho$  - радіальні напруження, МПа;

$\sigma_\theta$  - тангенціальні напруження, МПа.

Рівняння пластичності в спрощеному виді по енергетичній теорії при умові, що  $\sigma_\rho$  і  $\sigma_\theta$  являються крайніми головними напруженнями із врахуванням зміцнення, буде [119] (визначення для зони стиску і зони розтягу)

Для зони стиску:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = -\beta \cdot \left( \sigma_{T,0} - \Pi \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right). \quad (2.84)$$

Для зони розтягу:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \cdot \left( \sigma_{T,0} + \Pi \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right), \quad (2.85)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження  $\sigma_z$ ;

$\sigma_{T,0}$  - екстрапольована границя текучості матеріалу, МПа;

$\Pi$  - лінійний модуль зміцнення, МПа;

$\rho_n$  - радіус нейтральної поверхні деформації, мм;

Через те, що при згині широкої стрічки аксіальні деформації  $\varepsilon_z$  рівні нулю, що відповідає умові плоского стану деформації, коефіцієнт  $\beta$  буде дорівнювати 1,15. Радіус нейтральної поверхні деформації визначається рівнянням [87]:

$$\rho_n = \sqrt{R_1 \cdot r_1}, \quad (2.86)$$

де  $R_1$  - зовнішній радіус гнуття стрічки по лініях згину, мм.

Після розв'язку системи рівнянь (2.84), (2.85), (2.86) із використанням граничних умов, при яких для зони розтягу  $\sigma_\rho = 0$  при  $\rho = R_1$ , а для зони стиску  $\sigma_\rho = 0$  при  $\rho = r_1$ , знаходимо формули, що характеризують розподіл напружень  $\sigma_\rho$  і  $\sigma_\theta$  з врахуванням зміцнення матеріалу [27]:

для зони розтягу:

$$\sigma_\rho = -\beta \cdot \left( \sigma_{T.0} + \frac{\Pi}{2} \cdot \ln \frac{\rho \cdot R_1}{\rho_n^2} \right) \cdot \ln \frac{R_1}{\rho}; \quad (2.87)$$

$$\sigma_{\theta_{роз}} = \beta \cdot \sigma_{T.0} \cdot \left( 1 - \ln \frac{R_1}{\rho} \right) + \beta \cdot \frac{\Pi}{2} \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} - \ln \cdot \frac{R_1 \cdot \rho}{\rho_n^2} \cdot \ln \frac{R_1}{\rho} \right); \quad (2.88)$$

для зони стиску:

$$\sigma_\rho = -\beta \cdot \left( \sigma_{T.0} + \frac{\Pi}{2} \cdot \ln \frac{\rho_n^2}{\rho \cdot r_1} \right) \cdot \ln \frac{\rho}{R_1}; \quad (2.89)$$

$$\sigma_{\theta_{ст}} = -\beta \cdot \left( \sigma_{T.0} \cdot \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r_1} \right) + \frac{\Pi}{2} \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{\rho_n}{\rho} + \ln \frac{\rho_n^2}{\rho \cdot r_1} \cdot \ln \frac{\rho}{r_1} \right) \right). \quad (2.90)$$

Виведена аналітична залежність для визначення моменту розгинання витка  $M_{зг}$  із врахуванням зміцнення можна визначити як інтегральну суму моментів створених тангенціальними напруженнями  $\sigma_\theta$ :

$$M_{зг} = \int_{\rho_n}^{R_1} \sigma_{\theta_{розт}} \cdot \rho d\rho + \int_{r_1}^{\rho_n} \sigma_{\theta_{ст}} \cdot \rho d\rho. \quad (2.91)$$

Підставляючи значення формул (2.89), (2.90) у формулу (2.91) одержимо [27]:

$$M_{зг} = \beta \cdot B_0 \cdot \left[ \sigma_{T.0} \cdot \frac{H_0^2}{4} + \Pi \cdot \left( \frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right], \quad (2.92)$$

де  $B_0$  – ширина витка, мм;

$H_0$  – товщина витка, мм.

Радіус кривизни розігнутого витка визначили, враховуючи попередні дослідження [65]:

$$\rho_0 = \frac{T}{\frac{4k^2(1+n)}{n} \cos^2 \varphi_0 \cos \delta - 4k (\cos \varphi_0)^{\frac{2}{1+n}} \left[ \frac{\sqrt{2}}{4} B(p', q') - \Psi_2(k, \varphi_0) \right] \sin \delta}, \quad (2.93)$$

де  $T$  – крок витків, мм;

$k, \varphi_0$  - еліптичні параметри;

$n$  – константа апроксимуючої кривої зміцнення матеріалу гвинтової заготовки;

$\delta$  – кут дії сили розгинання, град;

$B(p', q')$  - Гамма-функція;

$\Psi_2(k, \varphi_0)$  - функція еліптичного інтеграла.

При цьому зовнішній і внутрішній радіуси згину визначаються за формулами:

$$R_1 = \rho_0 + \frac{H_0}{2}; \quad (2.94)$$

$$r_1 = \rho_0 - \frac{H_0}{2}. \quad (2.95)$$

Виведена аналітична залежність для визначення осьової сили деформації витків, враховуючи формули (2.90), (2.91) знаходимо за формулою:

$$W = \frac{\beta_1 \cdot B_0 \cdot \left[ \sigma_{T.0} \cdot \frac{H_0^2}{4} + \Pi \cdot \left( \frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right]}{R}. \quad (2.96)$$

А також визначаємо необхідний крутний момент на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок, враховуючи формули (2.77), (2.91), (2.96).

$$M_{кр} = \beta_1 \cdot B_0 \cdot \left[ \sigma_{T.0} \cdot \frac{H_0^2}{4} + \Pi \cdot \left( \frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right] \cdot [\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_1] \cdot (2.97)$$

На основі формули (2.97) побудовані графічні залежності крутного моменту на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок від ширини, товщини витка та кута нахилу клина для сталі 08кп (рис. 2.13-2.15).

Із графіків видно, що збільшення ширини витка, товщини витка та кута нахилу клина призводить до зростання крутного моменту на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок.

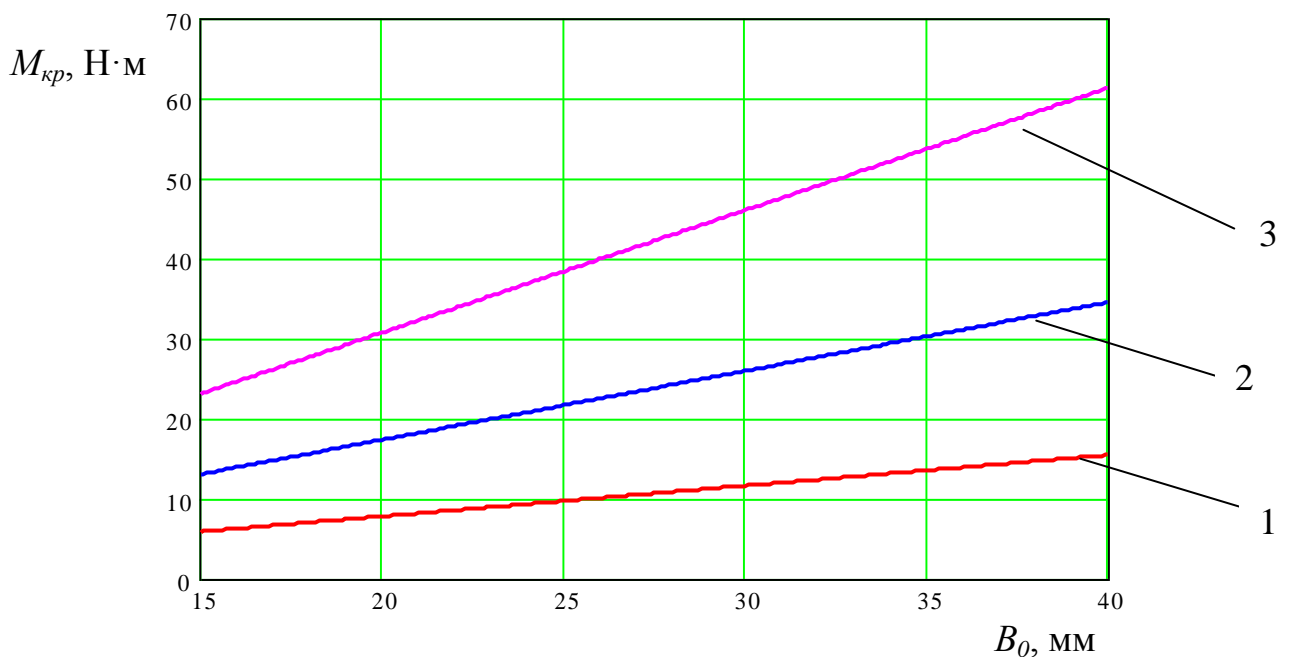


Рис. 2.13. Графіки залежності крутного моменту на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок від ширини витка (сталь 08кп)

$\alpha = 20$  град: 1 –  $H_0 = 2$  мм; 2 –  $H_0 = 3$  мм; 3 –  $H_0 = 4$  мм

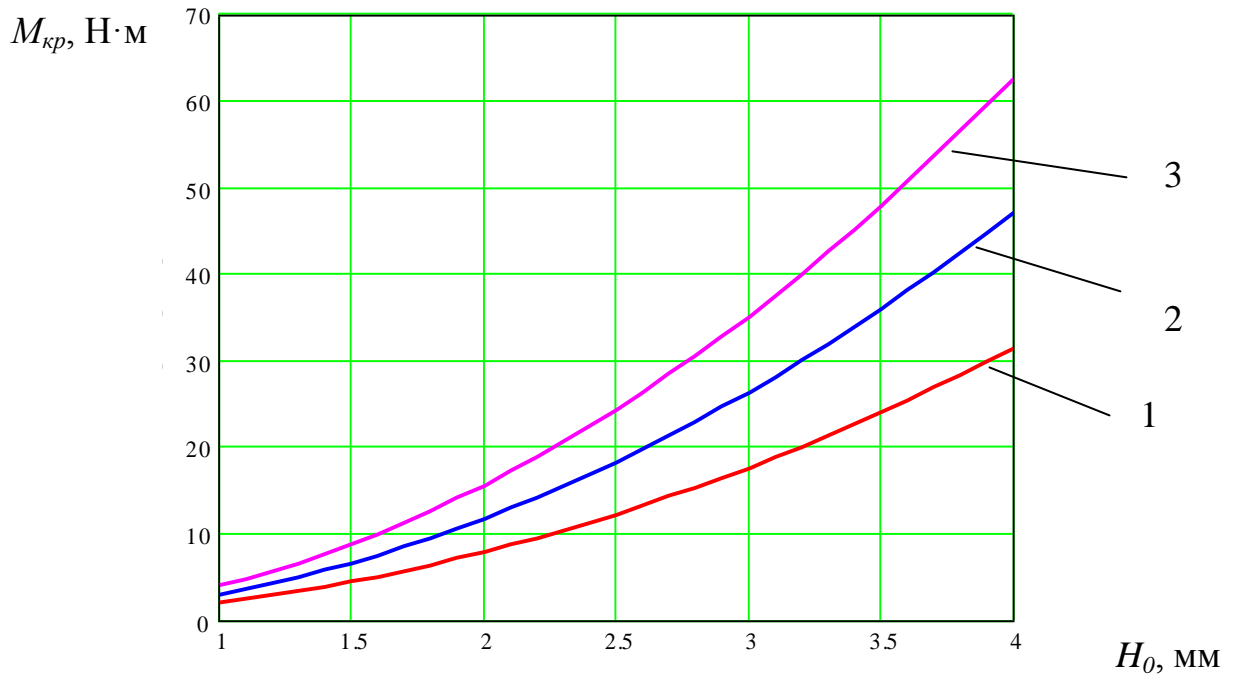


Рис. 2.14. Графіки залежності крутного моменту на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок від товщини витка (сталь 08кп)  
 $\alpha = 20$  град: 1 –  $B_0=20$ мм; 2 –  $B_0=30$ мм; 3 –  $B_0=40$ мм

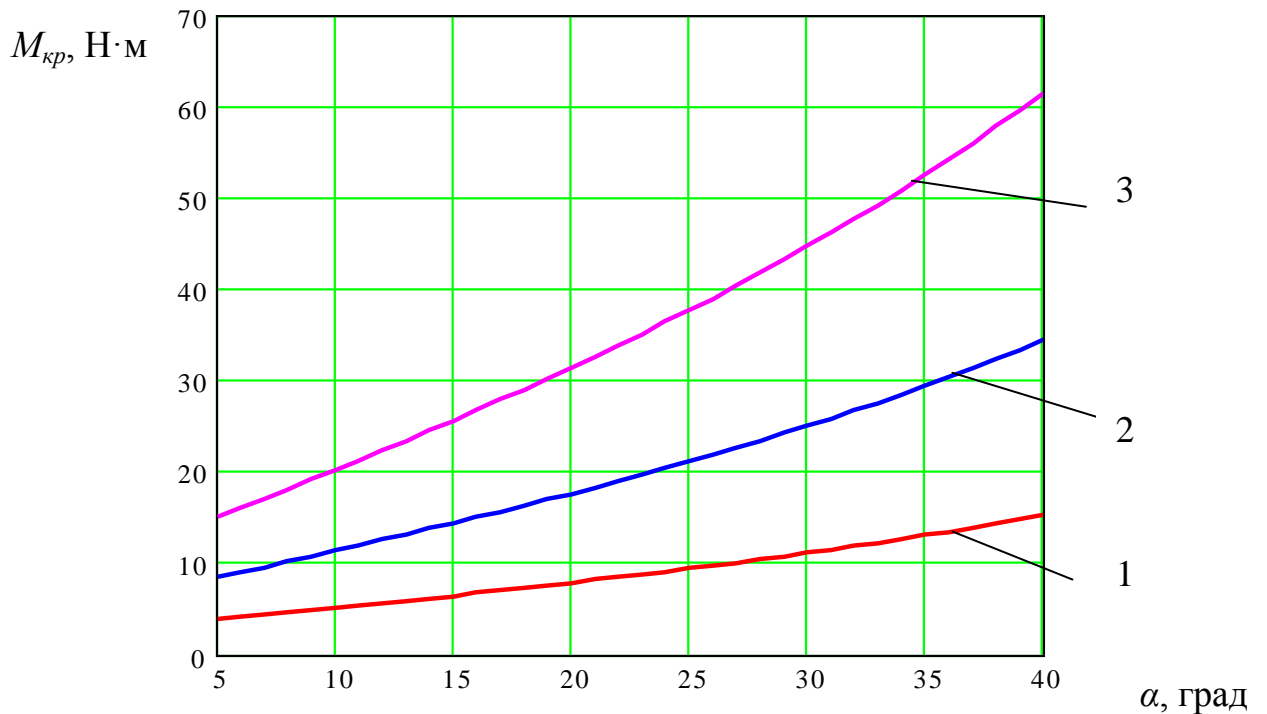


Рис. 2.15. Графіки залежності крутного моменту на приводі для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок від кута нахилу клина (сталь 08кп)  
 $\alpha = 20$  град: 1 –  $H_0=2$ мм; 2 –  $H_0=3$ мм; 3 –  $H_0=4$ мм

### 2.4.2. Динамічна модель калібрування конічної гвинтової заготовки на крок

На основі досліджень встановлено, що в процесі калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок виникають динамічні коливання оправки, при цьому амплітуда коливань збільшується із збільшенням ширини витка. Коливання виникає як у вертикальній площині, так і в горизонтальній, а також супроводжується крутильними коливаннями. Оскільки коливання оправки має вплив на міцність оправки, а також на продуктивність процесу калібрування, виникає необхідність у дослідженні динамічних навантажень на елементи установки для калібрування гвинтових заготовок на крок та характер переміщення її складових. Ці переміщення можна знайти за допомогою вирішення диференціальних рівнянь руху. Для спрощення розрахунків виконуємо деяку ідеалізацію системи, викидаючи другорядні фактори.

Розрахункову схему процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок можна представити так, як це показано на рис. 2.16. Ця модель представлена у вигляді зосереджених мас, що з'єднані пружними зв'язками. Пружні зв'язки допустимо невагомими, що характеризуються постійним коефіцієнтом жорсткості.

Місцевими напруженнями і деформаціями в місцях з'єднання окремих елементів будемо нехтувати. 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. Крім цього, на рисунку показані коефіцієнти жорсткості:  $C_{12}$  – приведена 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,  $\beta_{1z}$ ,  $\beta_{1y}$  – коефіцієнти демпфування лінійних коливань оправки для калібрування відповідно в напрямках осей  $z$  та  $y$ ;  $\beta_{2z}$  – коефіцієнт демпфування лінійних коливань клина в напрямку осі  $z$ ,  $\beta_{23y}$  – коефіцієнт демпфування лінійних коливань клина в напрямку осі  $y$ ,  $\beta_{3y}$  – 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  $\omega$ . Крім цього на двигуні прикладений крутний момент  $M_d$ .

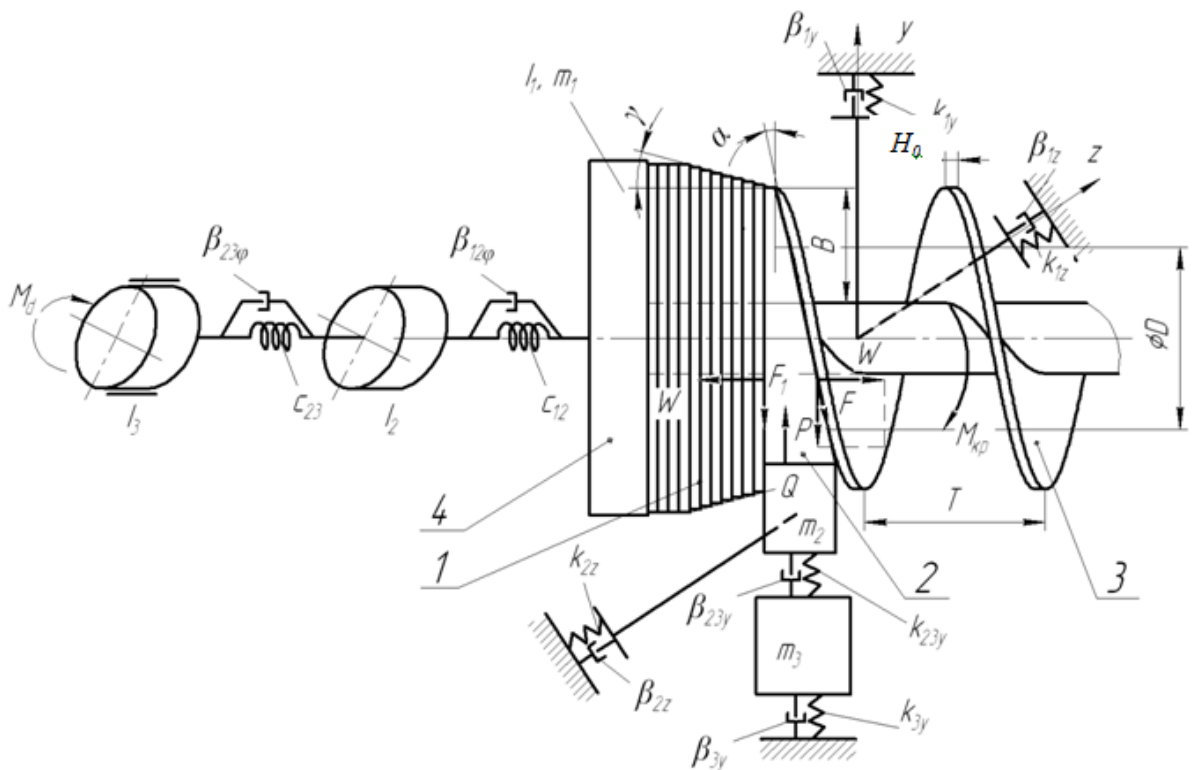


Рис. 2.16. Розрахункова схема процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок: 1 – щільно навіта конічна заготовка, 2 – клин; 3 – калібровані на крок  $T$  витки гвинтової заготовки; 4 – оправка для калібрування

Силу подачі клина визначаємо за формулою [44]:

$$Q(t) = \frac{2\beta \cdot B(t) \cdot \left[ \sigma_{T.0} \cdot \frac{H_0^2}{4} + \Pi \cdot \left( \frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right]}{D} \left[ \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_{12} \right], (2.98)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження  $\sigma_z$ ;

$B(t)$  - змінна ширина витка, мм;

$\sigma_{T.0}$  - екстрапольована границя текучості, МПа;

$H_0$  - товщина витка, мм;

$\Pi$  - лінійний модуль зміцнення, МПа;

$R_1, r_1$  - зовнішній і внутрішній радіуси гнуття витка під час калібрування, мм;

$D$  - середній діаметр заготовки до калібрування, мм;

$\alpha$  - кут нахилу клина, град;

$\varphi$  - кут тертя на похилій площині клина, град;

$\varphi_{12}$  - кут тертя на вертикальній площині клина, град;

$t$  - час, с.

Крутний момент  $M_{кр}$  на оправці [44]:

$$M_{кр}(t) = \beta \cdot B(t) \cdot \left[ \sigma_{T.0} \cdot \frac{H_0^2}{4} + \Pi \cdot \left( \frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right] \left[ \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi_{12} \right]. (2.99)$$

Наша система має 8 степеней вільності. Виберемо в якості узагальнених координат  $\varphi_1$  - кут повороту оправки (вважаємо додатнім в напрямку проти годинникової стрілки);  $\varphi_2$  - кут повороту шпинделя;  $\varphi_3$  - 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  $y$ . Додатні напрямки переміщення показані на рисунку 2.16.

Отримаємо диференціальні рівняння коливання без врахування опору середовища за допомогою рівняння Лагранжа другого роду:



$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = Q_j \quad (j=1,8). \quad (2.100)$$

Тоді кінетична енергія системи:

$$T = \frac{I_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{I_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2}{2} + \frac{I_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2}{2} + \frac{m_2 \cdot (\dot{z}_2^2 + \dot{y}_2^2)}{2} + \frac{m_1 \cdot (\dot{z}_1^2 + \dot{y}_1^2)}{2} + \frac{m_3 \cdot \dot{y}_3^2}{2}. \quad (2.101)$$

Потенціальна енергія системи:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)^2}{2} + \frac{C_{23} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{k_{1z} \cdot (z_1 - R\varphi_1)^2}{2} + \frac{k_{2z} \cdot z_2^2}{2} + \frac{k_{1y} \cdot y_1^2}{2} + \\ & + \frac{k_{23y} \cdot (y_3 - y_2)^2}{2} + \frac{k_{3y} \cdot y_3^2}{2}. \end{aligned} \quad (2.102)$$

де  $R$  – радіус оправки для калібрування.

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = I_1 \dot{\varphi}_1; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) = I_1 \ddot{\varphi}_1; \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_1} = -C_{12}(\varphi_2 - \varphi_1) - k_{1z}R(z_1 - R\varphi_1).$$

Отже, перше рівняння прийме вигляд

$$I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 - C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) - k_{1z}R(z_1 - R\varphi_1) = M_{кр}.$$

Для другого рівняння

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} = I_2 \dot{\varphi}_2; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) = I_2 \ddot{\varphi}_2; \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_2} = C_{12}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3).$$

$$I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) = 0.$$

Аналогічно отримуємо наступні шість рівнянь. Остаточно повна система рівнянь задачі має вигляд:

$$\begin{aligned}
I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 - C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) - k_{1z} R(z_1 - R\varphi_1) &= M_{kp}(t), \\
I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) &= 0, \\
I_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 + C_{23} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) &= -M_d, \\
m_2 \cdot \ddot{z}_2 + k_{2z} z_2 &= Q(t) \operatorname{tg} \varphi, \\
m_1 \cdot \ddot{z}_1 + k_{1z} (z_1 - R\varphi_1) &= Q(t) \operatorname{tg} \varphi, \\
m_3 \cdot \ddot{y}_3 + k_{23y} (y_3 - y_2) + k_{3y} y_3 &= 0, \\
m_2 \cdot \ddot{y}_2 - k_{23y} (y_3 - y_2) &= Q(t), \\
m_1 \cdot \ddot{y}_1 + k_{1y} y_1 &= Q(t).
\end{aligned} \tag{2.103}$$

Якщо враховувати розсіювання енергії, то рівняння запишуться так

$$\begin{aligned}
I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 - C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) - \beta_{12\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) - k_{1z} R(z_1 - R\varphi_1) - \beta_{1z} R(\dot{z}_1 - R\dot{\varphi}_1) &= M_{kp}(t), \\
I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + C_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + \beta_{12\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) + \beta_{23\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) &= 0, \\
I_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 + C_{23} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) + \beta_{23\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) &= -M_d, \\
m_2 \cdot \ddot{z}_2 + k_{2z} z_2 + \beta_{2z} \dot{z}_2 &= Q(t) \operatorname{tg} \varphi, \\
m_1 \cdot \ddot{z}_1 + k_{1z} (z_1 - R\varphi_1) + \beta_{1z} (\dot{z}_1 - R\dot{\varphi}_1) &= Q(t) \operatorname{tg} \varphi, \\
m_3 \cdot \ddot{y}_3 + k_{23y} (y_3 - y_2) + \beta_{23y} (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_{3y} y_3 + \beta_{3y} \dot{y}_3 &= 0, \\
m_2 \cdot \ddot{y}_2 - k_{23y} (y_3 - y_2) - \beta_{23y} (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) &= Q(t), \\
m_1 \cdot \ddot{y}_1 + k_{1y} y_1 + \beta_{1y} \dot{y}_1 &= Q(t).
\end{aligned} \tag{2.104}$$

Досліджуючи ударну взаємодію клина із витком конічної гвинтової заготовки, враховуємо лише дію миттєвої сили удару  $P_y$ , яка є великою, але такою, що створює імпульс із скінченною величиною [86]:

$$\vec{S}_1 = \int_{t_0}^{t_0+t_{K2}} \vec{P}_y dt, \tag{2.105}$$

де  $t_0$  - початковий момент часу, с;

$t_{K2}$  - тривалість удару, с.

Під час зіткнення твердих тіл  $t_{K2}$  має порядок  $10^{-4}$ с. Як відомо із теоретичної механіки:

$$\vec{S}_1 = m_1 \cdot \vec{V}_K - m_1 \cdot \vec{V}_H, \quad (2.106)$$

де  $V_K$  - кінцева відносна лінійна швидкість руху оправки для калібрування, м/с;  
 $V_H$  - початкова відносна лінійна швидкість руху оправки для калібрування, м/с.

Для нашого випадку  $t_0 = 0$ ,  $V_H = 0$ , кінцева відносна лінійна швидкість руху оправки для калібрування  $V_K$  рівна швидкості переміщення. Оскільки удар не є абсолютно пружним, вводимо коефіцієнт відновлення  $K_B$ , що враховує фізико-механічні властивості матеріалів і лежить на проміжку  $0 < K_B < 1$ . Прийmemo силу удару  $P_1$  постійною на проміжку від  $t_0$  до  $t_{K2}$ . Тому, прирівнюючи рівняння (2.105) і (2.106), враховуючи коефіцієнт відновлення, після відповідних перетворень одержимо:

$$P_1 = K_B \cdot \frac{m_1 \cdot V_K}{t_{K2}}. \quad (2.107)$$

Для того щоб ввести силу удару  $P_y$  у динамічну модель, враховуючи її короткочасну дію, вводимо допоміжний безрозмірний коефіцієнт:

$$F_9 = b \cdot \left( 1 - \frac{t}{t_{K2}} \right), \quad (2.108)$$

де  $b$  – коефіцієнт на порядок вищий за величину сили удару.

Тоді силу удару представимо алгебраїчною функцією:

$$P_y = \frac{F_9 + P_1 - |F_9 - P_1| + |F_9 + P_1 - |F_9 - P_1||}{4}. \quad (2.109)$$

Зміну сили удару у часі  $t$  представимо на рисунку 2.17.

Зміну ширини витка кінчної частини гвинтової заготовки залежно від повороту оправки можна представити залежністю:

$$B = B_0 + \eta \frac{B_1 - B_0}{2\pi}, \quad (2.110)$$

де  $B_0$  – початкова ширина витка, мм;

$B_1$  - ширина наступного витка гвинтової заготовки, мм;

$\eta$  - кут повороту оправки, рад.

Згідно рис. 2.167 :

$$B_1 - B_0 = S \operatorname{tg} \gamma, \quad (2.111)$$

де  $\gamma$  - кут нахилу твірної конічної частини гвинтової заготовки, град.

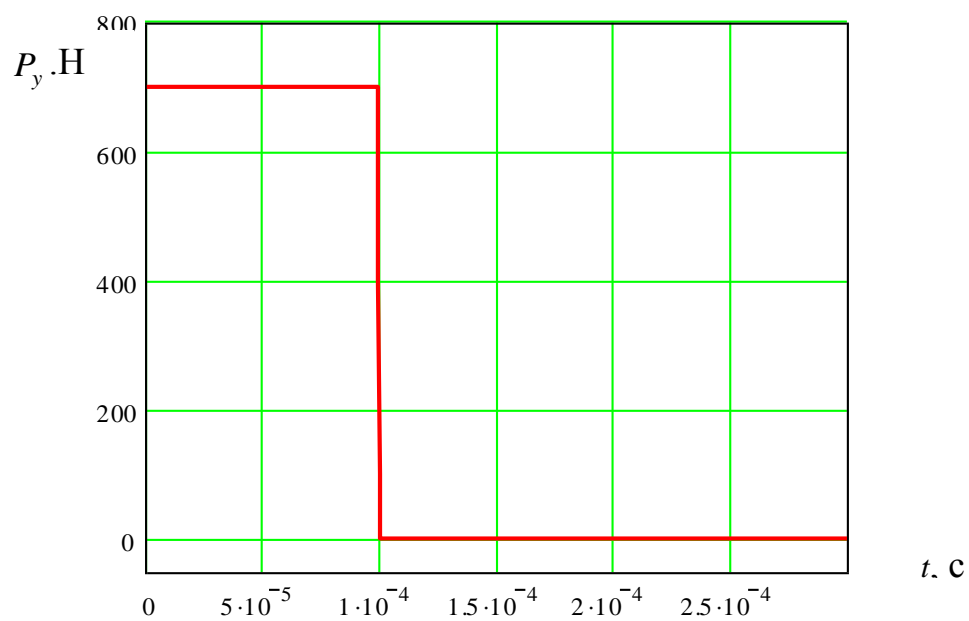


Рис. 2.17. Графік зміни сили удару клина із витком конічної гвинтової заготовки  $P_y$  у часі  $t$

Кут повороту оправки

$$\eta = \omega t. \quad (2.112)$$

Підставляючи рівняння (2.112) та (2.111) у рівняння (2.110), одержуємо:

$$B(t) = B_0 + \frac{\omega t S \operatorname{tg} \gamma}{2\pi}. \quad (2.113)$$

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:

$$Q(t) = \frac{Q_{\max}}{t_n} t + Q_0, \quad (2.114)$$

де  $Q_{\max}$  – максимальна сила подачі клина на циліндричній частині гвинтової заготовки, Н;

$t_n$  – час, на протязі якого проходить поступове зростання сили подачі клина на конічній частині гвинтової заготовки, с;

$Q_0$  – мінімальна сила подачі клина на конічній частині гвинтової заготовки, Н.

Час, на протязі якого проходить поступове зростання сили подачі клина на конічній частині гвинтової заготовки визначаємо за формулою:

$$t_n = \frac{2\pi k_1}{\omega}, \quad (2.115)$$

де  $k_1$  - кількість витків конічної частини гвинтової заготовки.

Використовуючи рівняння (2.114), силу подачі клина представимо залежностями:

$$Q_1(t) = \frac{Q(t) + Q_{\max}(t) - |Q(t) - Q_{\max}(t)| + |Q(t) + Q_{\max}(t) - |Q(t) - Q_{\max}(t)||}{4} \quad (2.116)$$

Зміну сила подачі клина згідно рівняння (2.116) представлено у вигляді графіка на (рис. 2.18).

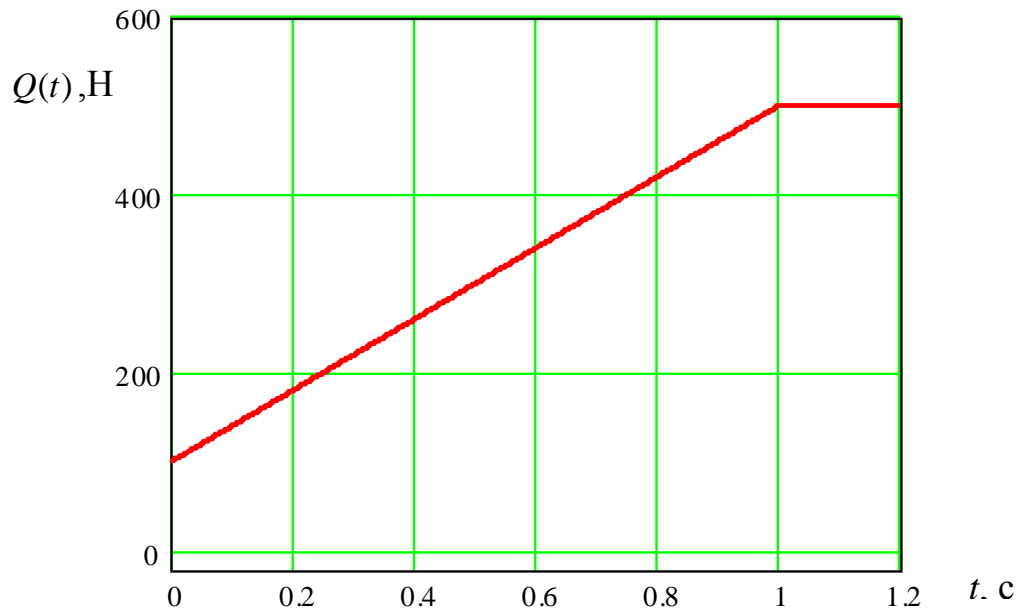


Рис. 2.18. Графік зміни в часі сили подачі клина

При калібруванні витка конічної гвинтової заготовки на крок до моменту зіткнення клина із гвинтовою заготовкою, від якого і ведемо відлік часу, не відбувається деформації пружних елементів системи. Тому, початкові відносні координати і швидкості приймаємо рівними нулю. Подальша деформація відбувається за рахунок дії зовнішніх сил. Отже, для  $t = 0$  маємо:

$$\varphi_1(0) = 0, \varphi_2(0) = 0, \varphi_3(0) = 0, z_1(0) = 0, z_2(0) = 0,$$

$$y_1(0) = 0, y_2(0) = 0, y_3(0) = 0, \quad (2.117)$$

$$\dot{\varphi}_1(0) = 0, \dot{\varphi}_2(0) = 0, \dot{\varphi}_3(0) = 0, \dot{z}_1(0) = 0, \dot{z}_2(0) = 0, \dot{y}_1(0) = 0, \dot{y}_2(0) = 0, \dot{y}_3(0) = 0.$$

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (2.104) з початковими умовами (2.117) доцільно провести на комп'ютері із застосуванням стандартної підпрограми чисельного методу Рунге-Кутта.

За результатами досліджень представлено графічні залежності зміни кута деформації шпинделя установки та оправки для калібрування в часі (рис. 2.19), лінійної деформації оправки для калібрування в напрямку осі  $y$  в часі (рис. 2.20), лінійної деформації клина в напрямку осі  $z$  в часі (рис. 2.21) та лінійної

деформації клина в напрямку осі  $y$  в часі (рис. 2.22) під час здійснення процесу калібрування витка конічної гвинтової заготовки на крок.

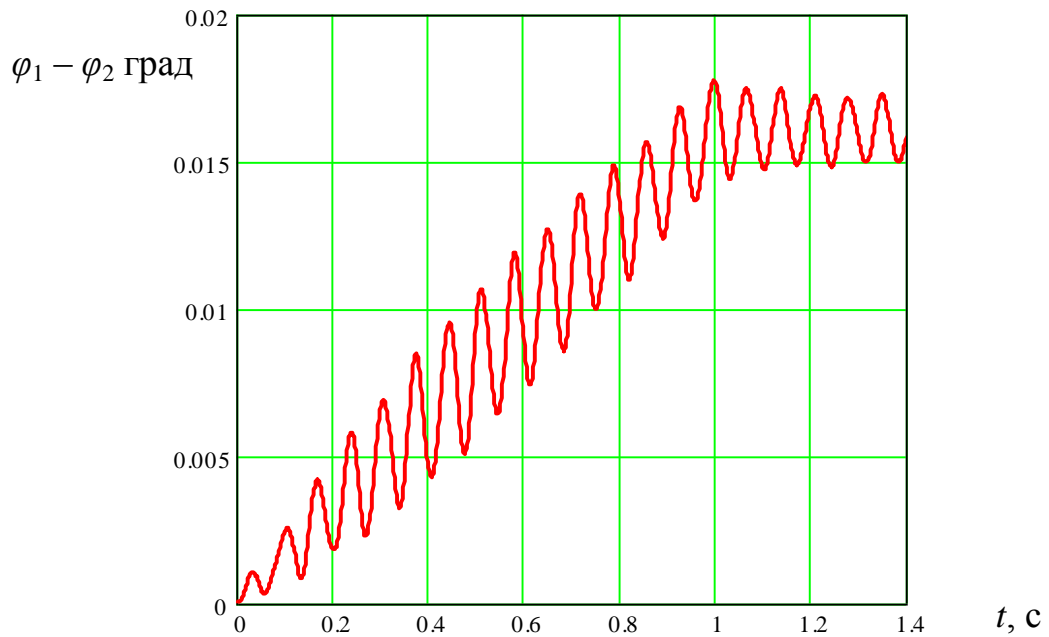


Рис. 2.19. Графік зміни кута деформації шпинделя установки та оправки для калібрування

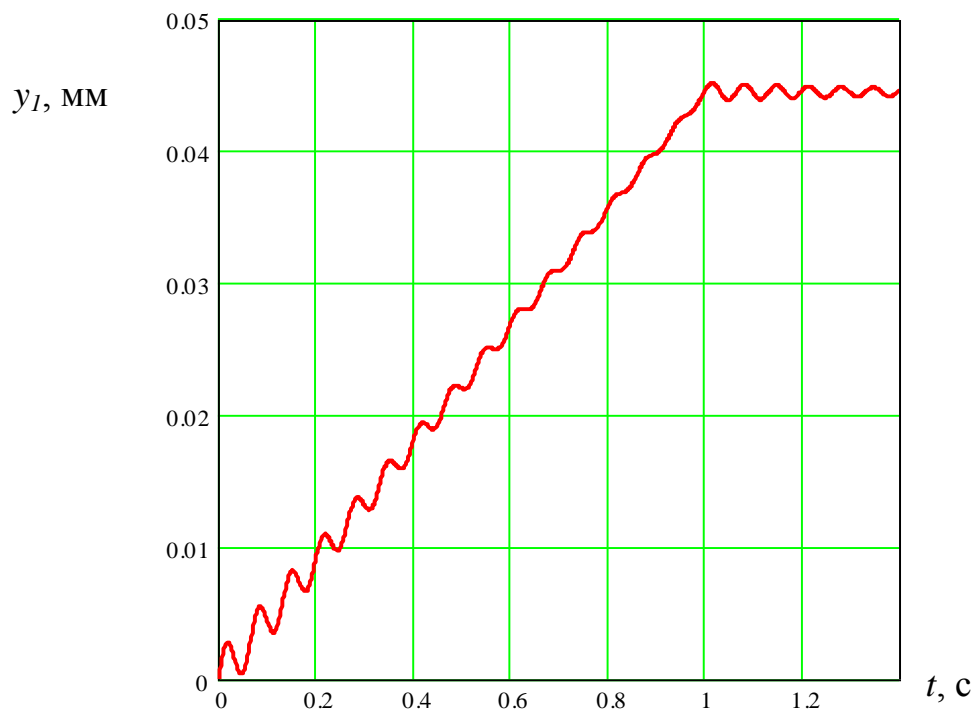


Рис. 2.20. Графік зміни лінійної деформації оправки для калібрування в напрямку осі  $y$  в часі

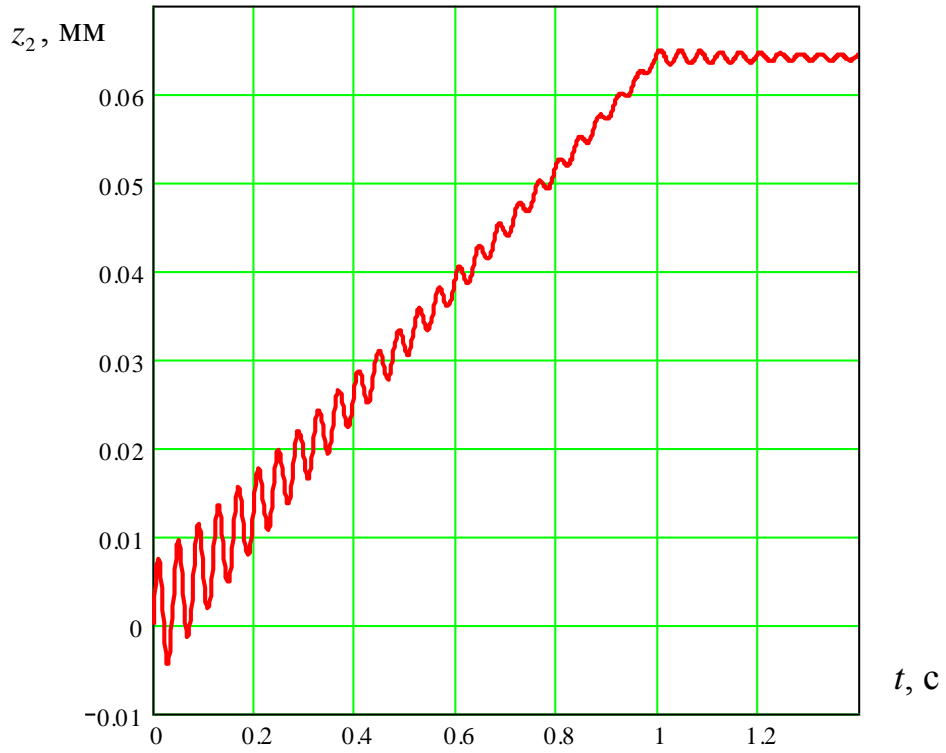


Рис. 2.21. Графік зміни лінійної деформації клина в напрямку осі  $z$  в часі

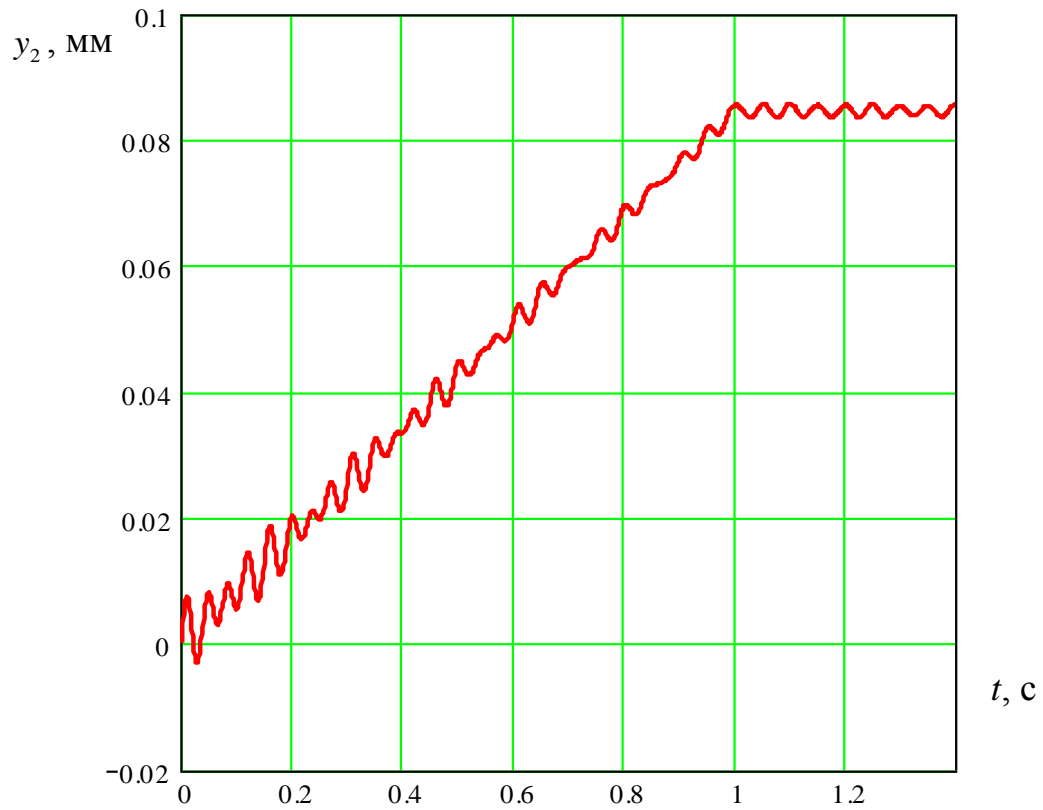


Рис. 2.22. Графік зміни лінійної деформації клина в напрямку осі  $y$  в часі



Для перевірки адекватності запропонованої системи диференціальних рівнянь усі її складові визначались експериментально. Із представлених графічних залежностей (рис. 2.19 – рис. 2.22) видно, 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.

## 2.5. Висновки

1. Проведено структурний синтез способів навивання спіралей шнеків обертовою втулкою методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу й отримано ряд згенерованих конструкцій з покращеними техніко-економічними характеристиками, що дало можливість розширити параметри навивання спіралей шнеків із забезпеченням отримання різних видів спіралей.

2. Досліджено процес навивання ГСЗ пристроєм з обертовою втулкою. Отримано аналітичні залежності, на основі яких встановлено момент навивання (згину)  $M_{зг}$  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  $M_{зг}$  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. Встановлено, що при товщині стрічки  $H_0 = 1$  мм, сила гнуття профільної стрічки притискним роликом знаходиться в межах

$P_1 = 1500 - 1800$  Н, а момент, який необхідно прикласти для обертання оправки  $M_0 = 55 - 72$  Н·м, при  $H_0 = 1,5$  мм сила гнуття знаходиться в межах  $P_1 = 2200 - 2700$  Н, а момент  $M_0 = 80 - 108$  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. Ці параметри повторюються періодично із періодом  $2\pi$ .

4. Розроблена розрахункова схема динамічної моделі процесу калібрування конічної гвинтової заготовки на крок. Виведені аналітичні залежності для визначення необхідного крутного моменту на приводі для здійснення калібрування, а також рівняння пластичності по енергетичній теорії з врахуванням зміцнення, виведено залежність для визначення осьової сили деформації витка. Складене диференціальне рівняння руху системи, застосувавши рівняння Лагранжа другого роду для визначення зміни кута деформації шпинделя установки та оправки для калібрування. На основі цих розрахунків виведені аналітичні залежності для визначення динамічних навантажень на систему

5. 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.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИГОТОВЛЕННЯ ШАРНІРНИХ СЕКЦІЙ ГВИНТОВОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ

#### 3.1. Програма експериментальних досліджень

На основі мети дисертаційної роботи, поставлених та вирішених завдань, програма проведення експериментальних досліджень включає реалізацію таких етапів:

1. На основі виконаного аналізу відомих конструкцій і технологій виготовлення розробити технологічний процес виготовлення гвинтової секції робочого органа.

2. Спроекувати і виготовити технологічне устаткування для виготовлення сферичної втулки ГСРО, формоутворення гвинтових секційних заготовок пристроєм з обертовою втулкою, процесу калібрування на крок витків гвинтового секційного робочого органа із щільного навивання та сили різання під час проточування ГСЗ.

3. Розробити методику та провести повнофакторний експеримент з виведенням рівнянь регресії для визначення основних конструктивних та силових параметрів процесу формоутворення заготовок для ГСРО пристроєм з обертовою втулкою, процесу калібрування на крок витків гвинтового робочого органа із щільного навивання, виготовлення сферичної втулки ГСРО та проточування ГСЗ.

4. Розробити методику проектування технологічного устаткування для виготовлення секційних гвинтових робочих органів з подальшим впровадженням у виробництво результатів досліджень.

### 3.2. Конструкція секційного робочого органу

Запропонована конструкція секційного гвинтового робочого органу з шарнірним з'єднанням секцій, загальний вигляд якого представлено на рис. 3.1, а його конструктивна схема - на рис. 3.2. [22]. Елементи секційного гвинтового робочого органу наведено в таблиці 3.1. Конструкцію секційного гвинтового робочого органу виконано з окремих секцій, внаслідок чого з правого кінця жорстко закріплено циліндричну втулку 1, із розміщенням в осьовому напрямку паралельних пазів 2, що розташованні по колу рівномірно, з паралельним до осі циліндричних втулок, що діють з тілами кочення 3. З іншої сторони тіла кочення 3 діють сферичними поверхнями сферичної втулки 4, що розташованні із внутрішньої сторони із створенням осьових і кутних повертань сферичних пальців 5.



Рис. 3.1. Загальний вигляд гвинтового секційного гвинтового робочого органу

З іншої сторони зварна циліндрична секція в отвір жорстко до осі встановлено з'єднувальна втулка 6, яка перпендикулярна із внутрішніми квадратними чи фасонними отворами 7 і яка зєднана кінцем сферичних пальців прилеглої секції із фіксованою гайкою 8. До зовнішнього діаметра

з'єднувальних втулок 6 приварені прутки по колу 9, а з іншого боку прутки приварені до зовнішніх діаметрів циліндричних втулок 1.

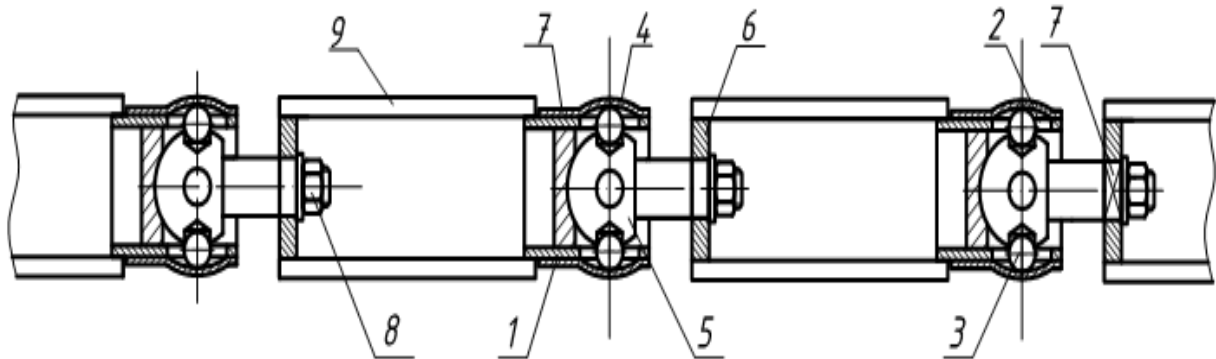


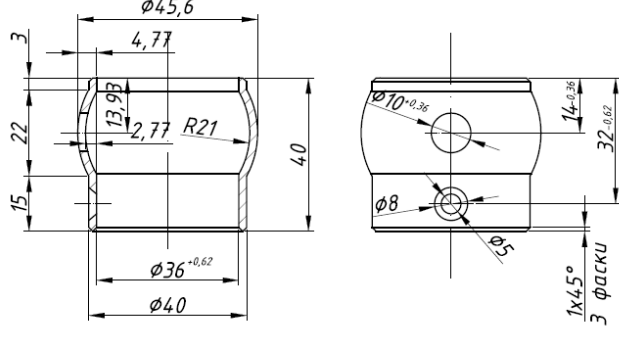
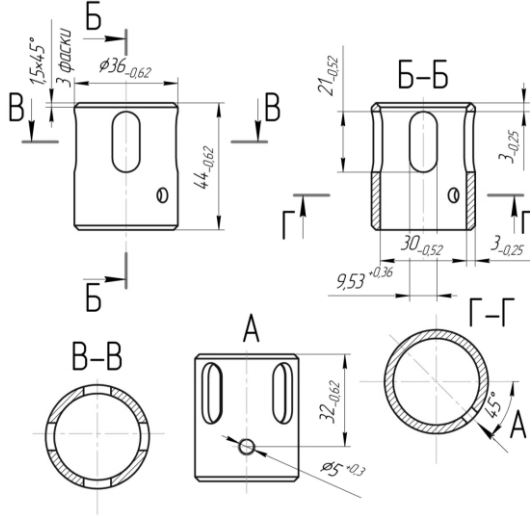
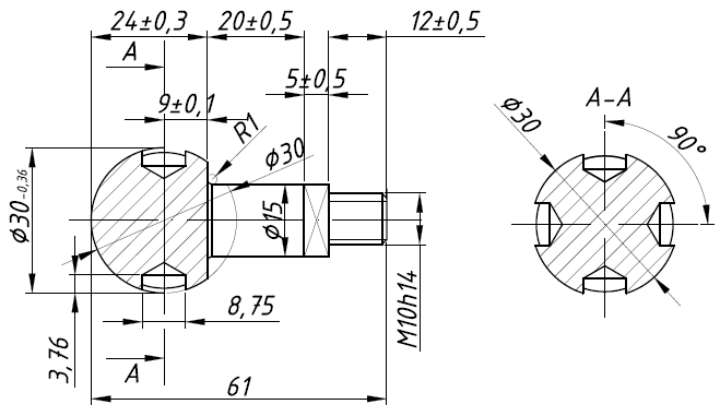
Рис. 3.2. Конструктивна схема гвинтового секційного робочого органу

На основі цього до даних прутків циліндричних секцій приварена гвинтовий елемент, яка здійснює подальші гвинтових елементи сусідньої секції.

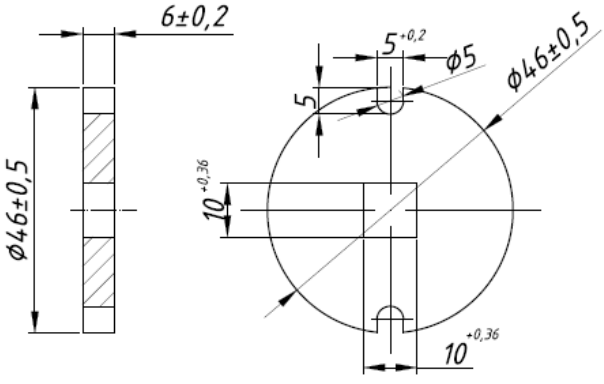
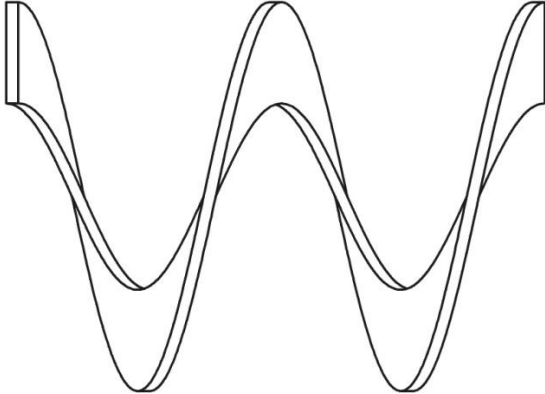
Робота гвинтового робочого органу здійснюється наступним чином, що обертовий рух передають через тіла кочення 3 на сферичний палець 5 внаслідок чого передається на інші сусідні секції гвинтового робочого органу.

Для забезпечення ефективної роботи гвинтового секційного робочого органу наведено технологічний процес його виготовлення. (Додаток Б) Встановлений мінімальний допустимий радіус кривизни технологічної магістралі, який дасть можливість збільшити продуктивність конвеєра на 20...30% та підвищити довговічність експлуатації запропонованого робочого органу.

## Конструктивні елементи гвинтового секційного робочого органу

№ п/п	Назва елемента	Технологічні операції
1.	<p style="text-align: center;">Втулка сферична</p> 	<p>001 Транспортувальна 005 Автоматна 010 Токарна 015 Вертикально-свердлильна 020 Вертикально-свердлильна 025 Вертикально-свердлильна 030 Приймальний контроль</p>
2.	<p style="text-align: center;">Втулка циліндрична</p> 	<p>001 Транспортувальна 005 Автоматна 010 Шпонково-фрезерна 015 Вертикально-свердлильна 020 Різенарізна 025 Приймальний контроль</p>
3.	<p style="text-align: center;">Сферична тяга</p> 	<p>001 Транспортувальна 005 Автоматна 010 Вертикально-фрезерна з ЧПК 015 Вертикально-свердлильна 020 Різенкатна 025 Приймальний контроль</p>

Продовження таблиці 3.1

4.	<p style="text-align: center;"><b>З'єднувальна втулка</b></p> 	
5.	<p style="text-align: center;"><b>Гвинтова заготовка</b></p> 	

### 3.3. Стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень

#### 3.3.1. Стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень виготовлення сферичної втулки (корпуса)

Сферичний корпус (рис. 3.3) призначений для розміщення в ньому внутрішніх деталей шарнірного робочого органу, зокрема внутрішня його сфера є у взаємодії з зовнішніми поверхнями тіл кочення, які передають крутний момент з однієї секції робочого органу на іншу, а також завдяки своїй сферичній поверхні забезпечується плавність руху робочого органу. Методика проведення дослідження процесу формоутворення сферичної поверхні, загальний вигляд якого представлено на рисунку 3.3, проводиться наступним чином. В прес пневмогідрравлічний Torgin TY30002 (TRD53003) вставляли

циліндричну заготовку, використовуючи спеціальний інструмент, після чого здійснювали процес формоутворення необхідної сферичної поверхні зі збором необхідних даних з допомогою манометра (рис. 3.4).

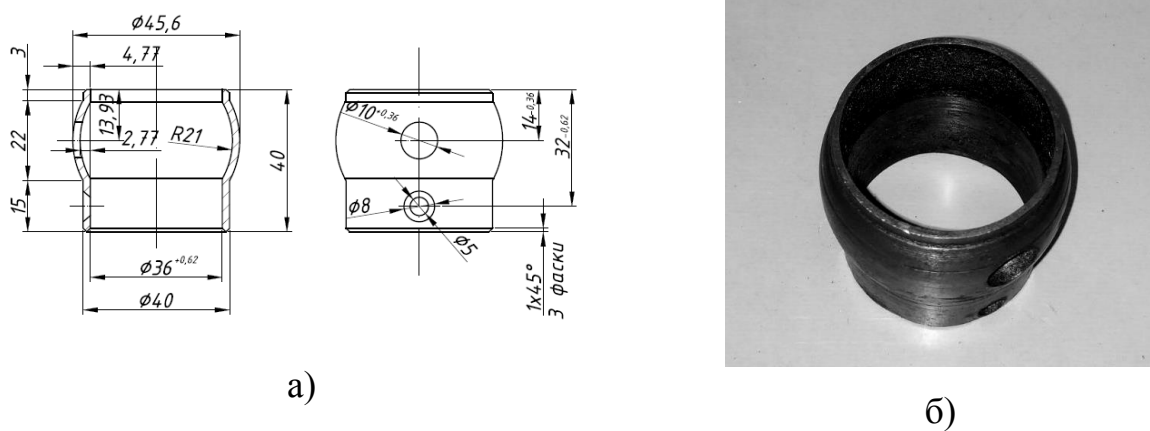


Рис. 3.3. Сферична втулка (корпус) а) конструктивна схема;  
б) загальний вигляд



Рис. 3.4. Загальний вигляд процесу формоутворення сферичної поверхні корпусу: 1 – прес формоутворення сферичної поверхні корпусу;  
2 – циліндрична заготовка; 3 – спеціальний інструмент для формоутворення поверхні; 4 – вимірювальний пристрій

В якості експериментальних зразків використовували трубу із внутрішнім діаметром  $d=40-50$  мм та товщиною 1,2, 1,5, 1,7 мм. Матеріали заготовки – сталь 08кп, Ст 3, зусилля становило  $P=4-7$  кН.



### 3.3.2. Стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень навивання гвинтових заготовок з обертовою втулкою

Пристрій для навивання гвинтових спіралей обертовою втулкою [39] наведено на рис. 3.5 і виконано у вигляді оправки, притискного, установчих і кріпильних елементів, пустотілої обертової формувальної втулки, при якому оправка жорстко кріпиться в патроні токарного верстата. На оправці жорстко закріплена ліва втулки, яка є у взаємодії з Г-подібним кінцем смуги для навивання гвинтового елемента, а з правого торця втулка перебуває у взаємодії з осьюовою пружиною стиснення.

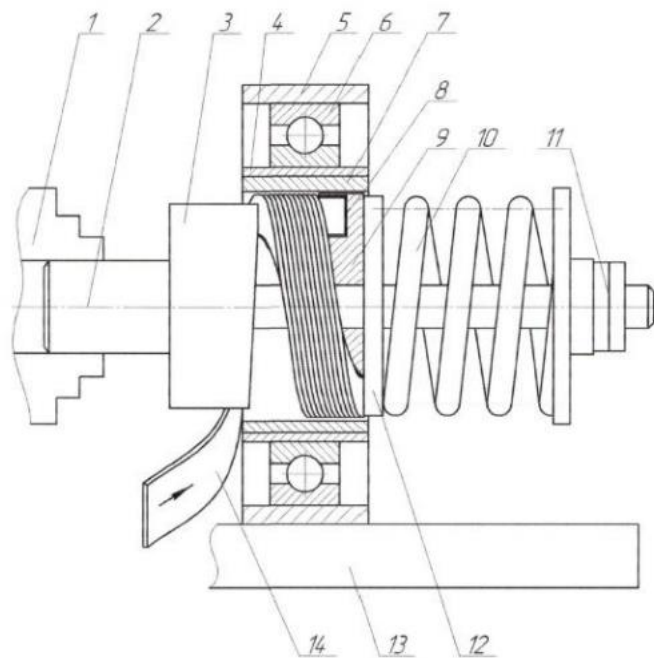


Рис. 3.5. Пристрій для навивання гвинтових спіралей обертовою втулкою  
[Патент № 127321]

Пристрій для навивання гвинтових спіралей обертовою втулкою складається з оправки 2, на якій закріплена втулка. Оправка 2 кріпиться в патрон 1 токарного верстата та лівий кінець правої втулки 9 всередині є паз 8, який контактує з Г-подібним кінцем смуги 14. Правий торець втулки 9 підтискається через шайбу 12 пружиною стиснення 10 та регулюється гайкою 11. В середині обертової формувальної втулки 5, яка жорстко кріпиться на

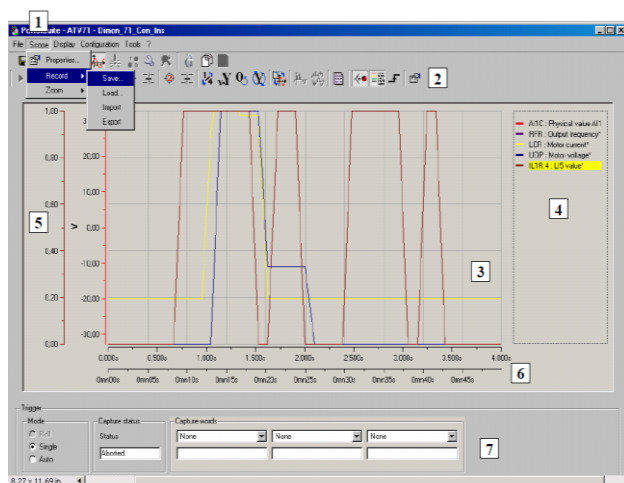
супорті верстата 13, встановлений підшипник 6, в якому розміщена кріпильна втулка 4, в якій є змінні формувальні ролики 7 з відповідними товщинами.

Для запуску двигуна, з зняттям експериментальних даних, а саме регулювання частоти обертання, застосували частотний перетворювач Altivar 71, який працює в діапазоні 0,7 кВт до 2,2 кВт з програмним забезпеченням PowerSuite v.2.5.0. [70].

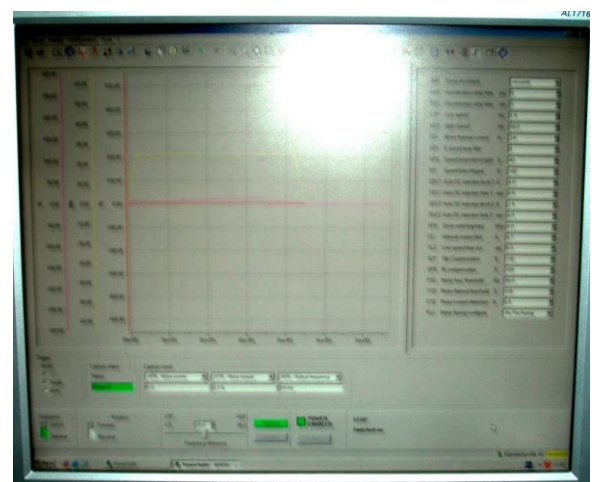
Приєднання Altivar 71 до електричної системи токарного верстата і до ПК здійснювали через силові кабелі. Для проведення експериментальних досліджень запускали токарний верстат для виконання технологічного процесу навівання гвинтової заготовки.

Після проведення процесу навівання у вікні програми Power Suite на дисплеї комп'ютера відображені дані зміни крутного моменту і зусилля навівання двигуна в часі. Результати одержали у форматі графічних залежностей у вікні програми PowerSuite v.2.5.0., що відображалися у вікні осцилографа (рис.3.6).

Для вимірювання швидкісних технологічних процесів вибирали крок часу в діапазоні 0,001-1 с. Максимальна кількість точок становила 4000. Кількість вимірювань сигналів вікна осцилографа (Scope) становить 4, та кількість точок одного сигналу пропорційно зменшується: 2-2000, 4-1000.



а) - вікно осцилографа



б) загальний вигляд процесу зняття даних на ЕОМ

Рис. 3.6. Процес зняття даних у вікні програми Power Suite

На рис. 3.7 наведено загальний вигляд перетворювача частоти Schneider Electric ALTIVAR 71 для регулювання швидкості або моменту проведення експериментальних досліджень.



Рис. 3.7. Загальний вигляд перетворювача частоти Schneider Electric ALTIVAR 71 (ATV 71)

Дані фіксувалися у відсотках від номінальних значень для крутного моменту і потужності двигуна. Номінальні значення визначалися на двигуні для крутного моменту із залежності [70]:

$$M_n = \frac{9554 \cdot P_n}{n} \quad (\text{Н}\cdot\text{м}),$$

де  $P_n$  – номінальна потужність двигуна (кВт);

$n$  – частота обертання (об/хв).

На рис. 3.8 наведено загальний вигляд експериментальної установки для технологічного процесу навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою, а також розібраному - на рис. 3.9. [39. 89].

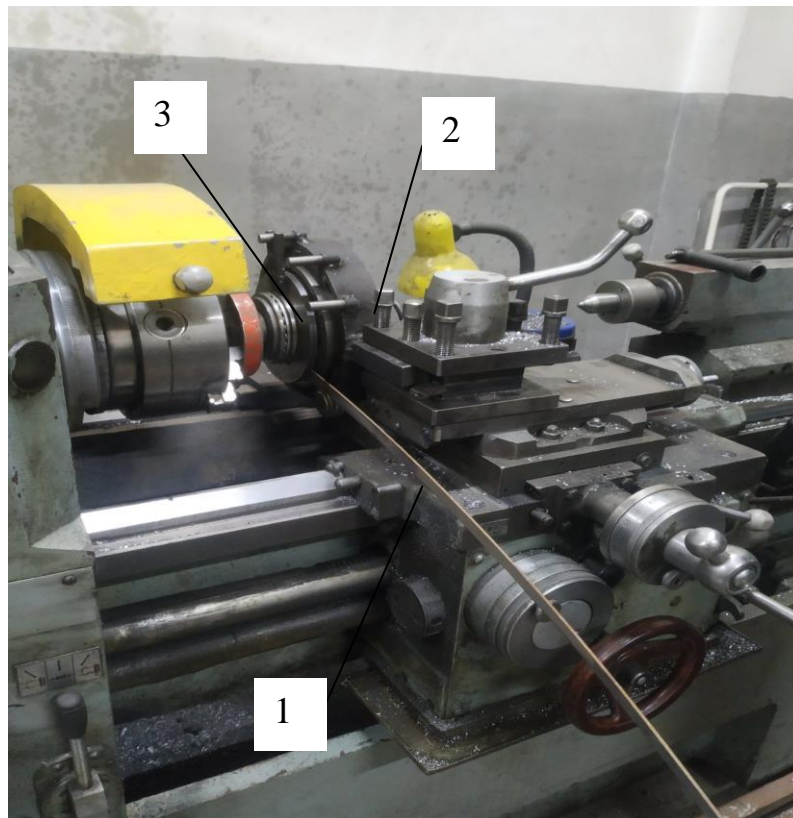


Рис. 3.8. Загальний вигляд експериментальної установки для технологічного процесу навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою: 1 - стрічка для навивання; 2 – гвинтова заготовка; 3 - пристрій для навивання

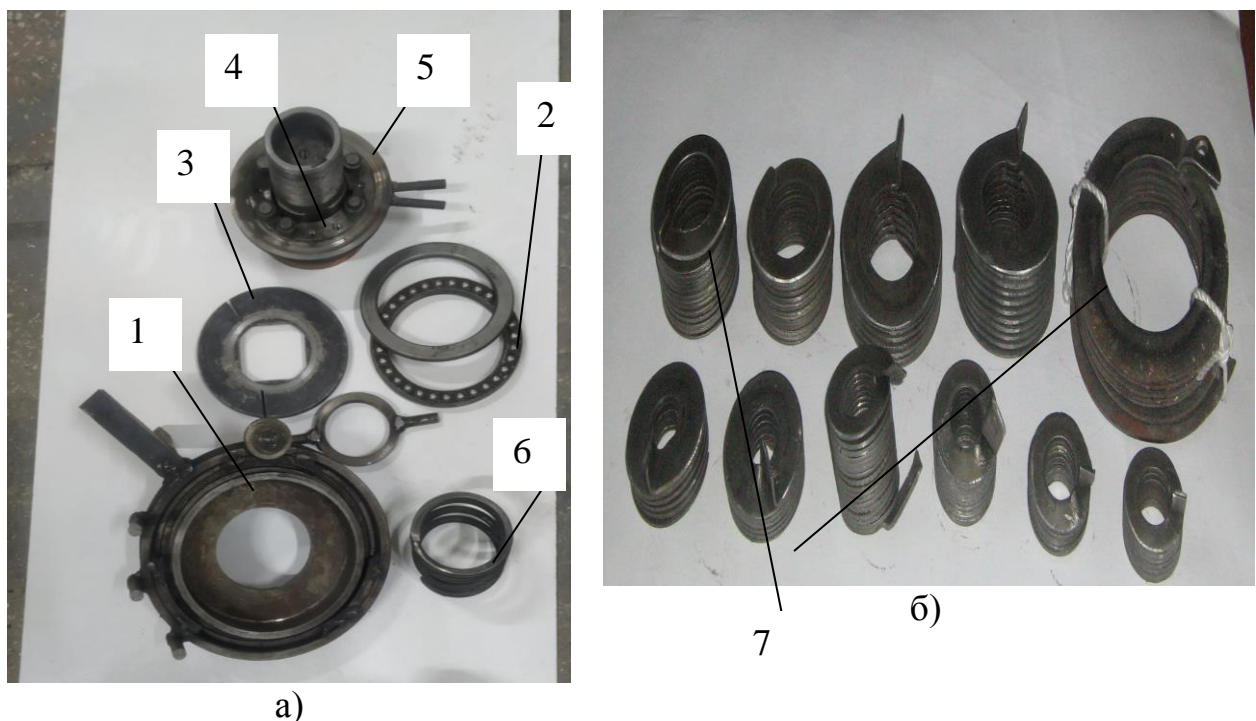


Рис. 3.9. Загальний вигляд пристрою для технологічного процесу навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою у розібраному вигляді – а) навиті гвинтові заготовки - б) : 1 – зовнішня обойма; 2 – підшипник; 3 – кільце; 4 – направляючі втулки; 5 – внутрішня обойма; 6 – пружина; 7 – гвинтова заготовка

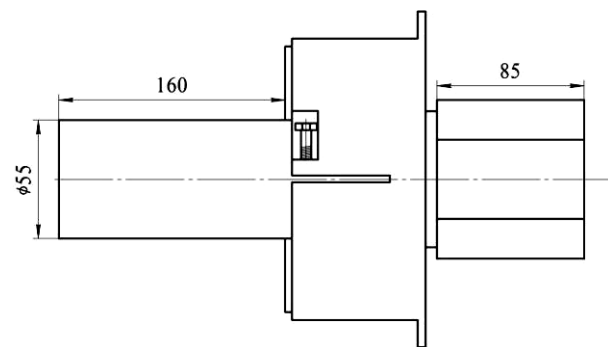
### 3.3.3. Стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень калібрування гвинтових заготовок

Для проведення експериментальних досліджень калібрування гвинтових заготовок використовували оправи 40, 50, 60 мм із зовнішнім діаметром 100, 120, 150 мм, одна з яких представлена на рис. 3.10. Дані шнекові оправи з однієї сторони мають ребра жорсткості для підтримання витка гвинтової спіралі від прогинання в напрямку її формоутворення. Експерименти проводили для гвинтових заготовок (ГЗ) із матеріалів сталь 08кп, Ст 3. [39, 91].

Проведено три серії експериментів для кожної із сталей. В патрон токарного верстату закріплювався вал діаметром, відповідним внутрішньому діаметру шнекової оправи.



а)



б)

Рис. 3.10. Оправа: а) загальний вигляд; б) конструктивна схема

Для проведення експериментальних досліджень розроблено та виготовлено дослідну установку яка представлена на рис. 3.11.

Робочу частину пристрою, із закріпленим формувальним роликком заводять у взаємодію із ГЗ. Після налагодження пристрою і входження його у взаємодію із ГЗ з клином для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок включають головний рух і рух подачі верстату, після чого починається процес. Реверсна подача головного руху верстату дає змогу здійснити калібрування отриманої заготовки на необхідний крок.

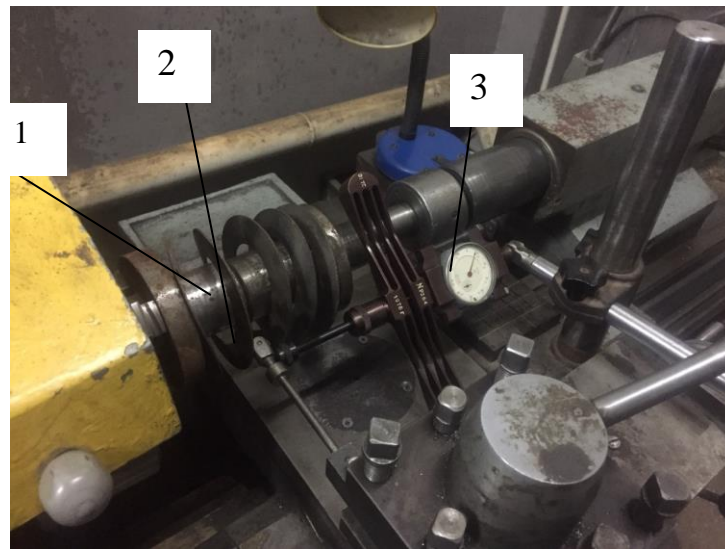


Рис. 3.11. Загальний вигляд експериментальної установки для калібрування гвинтових заготовок: 1 – гвинтова заготовка; 2 - клин для здійснення калібрування гвинтової заготовки; 3 - динамометр

### **3.3.4. Методика проведення експериментальних досліджень величини тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин**

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 гвинтових секційних робочих органів машин. Одним із способів формування конічних або радіусних профілів є проточування крайніх витків заготовок гвинтових секційних робочих органів у стиснутому стані після процесу навивання.

Для виконання поставлених завдань, відповідно до проведених попередніх досліджень виготовлення та використання гвинтових секційних робочих органів, літературного огляду експериментальні дослідження проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин склались із таких етапів:

1. Підібрали обладнання, затискні патрони та центри, ріжучі інструменти для проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів, а також обладнання для вимірювання тангенціальної сили різання.

2. Провели експериментальні дослідження тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин із сталі 08кп від зміни трьох основних технологічних факторів: глибини різання  $t$  прохідним різцем, подачі  $S$  прохідного різця та швидкості різання  $V$ .

Для проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів використовувались стандартні прохідні різці. Використання таких різців зумовлено значним зменшенням ударних навантажень при проточуванні стиснутих витків гвинтових секційних робочих органів порівняно із сформованими витками на крок, де доцільно використовувати різці із швидкоріжучої сталі.



Рис. 3.12. Процес розточування внутрішнього отвору заготовки гвинтового секційного робочого органу на токарно-гвинторізному верстаті:

1 – заготовка гвинтового секційного робочого органу із стиснутими витками; 2 – трьохкулачковий патрон; 3 – розточний різець; 4 – різцетримач

Товщина матеріалу витків становила 1 мм. Проточування здійснювали на токарно-гвинторізному верстаті з використанням стандартного трьохкулачкового патрона із затиском заготовки по внутрішньому отвору та

додатковим осьовим затиском і стисканням витків обертовим заднім центром через шайбу із центрувальним отвором.

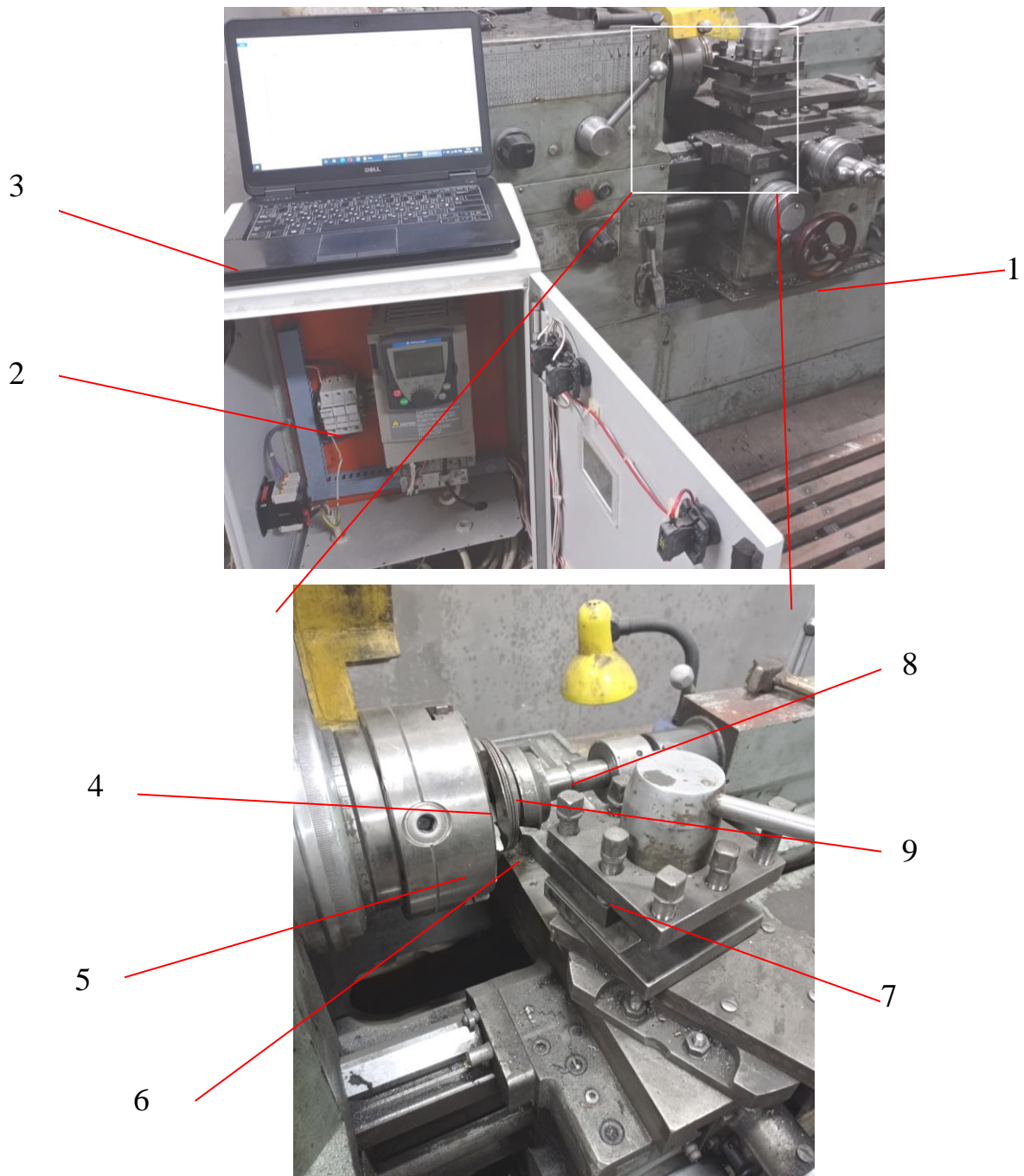


Рис. 3.13. Процес проточування витків заготовки гвинтового секційного робочого органу на токарно-гвинторізному верстаті:

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 – різцетримач; 8 – задній центр; 9 – затискна шайба



Параметри різця: передній кут  $\gamma=10^\circ$ , задній кут  $\alpha=10^\circ$ , радіус заокруглення при вершині різця  $\rho=0,5$  мм.

Для забезпечення точного базування заготовки при проточуванні витків проводили попереднє розточування її внутрішнього отвору на токарно-гвинторізному верстаті, що представлено на рисунку 3.12. [27, 81]

Для вимірювання тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин використовували частотний перетворювач Altivar та спеціальне програмне забезпечення, що описані в підрозділі 3.2.2. Процес проточування витків заготовки гвинтового секційного робочого органу на токарно-гвинторізному верстаті представлено на рисунку 3.13.

Частотний перетворювач забезпечував вимірювання і запис даних щодо крутного моменту  $M_u$  на шпинделі верстата, при цьому тангенціальну силу різання визначали за формулою  $P_z=M_u/R_z$ , де  $R_z$  – зовнішній радіус проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів.

Послідовність проведення експериментальних досліджень величини тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин та статистична обробка експериментальних даних аналогічна тій, що представлена в підрозділі 3.4.

Результати обробки даних експериментальних досліджень представлено в підрозділі 4.7.

### **3.4. Методика проведення багатofакторних експериментальних досліджень**

Для отримання (незалежних факторів  $x_i$ ) які впливають на конструктивно-кінематичні параметри виготовлення сферично втулки на зусилля утворення та технологічного процесу навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою, калібрування гвинтової заготовки (ГЗ) з визначенням крутного моменту для здійснення калібрування гвинтової заготовки на крок проведено окремі повнофакторні експерименти, тобто з визначенням зусилля

утворення сфери від зміни основних факторів та з визначенням крутного моменту від зміни основних факторів.

Для перевірки адекватності теоретичних досліджень (теоретичної моделі) моменту навивання від зовнішнього радіуса спіралі  $M_{зв}$ ,  $N_{\odot m}$ ; зусилля утворення сферично втулки секції робочого органа  $P_f$ ,  $N$ , крутного моменту  $M_{кр}$ ,  $N_{\odot m}$  на приводі та сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів, проведено експериментальні дослідження за допомогою лабораторних установок, які наведена на рис. 3.4., рис. 3.5, рис. 3.8 та рис. 3.13.

Основними незалежними змінними факторами, які впливали на процеси є при дослідженні:

а) моменту навивання від зовнішнього радіуса спіралі:

- товщина заготовки  $H_0$ , яку кодували індексом  $x_1$ ;
- зовнішній радіус оправки  $R$ , який кодували індексом  $x_2$ ;
- ширина стрічки  $B_0$ , яку кодували індексом  $x_3$ ;

б) зусилля утворення сфери:

- товщина заготовки  $s$ , яку кодували індексом  $x_1$ ;
- діаметр заготовки  $D$ , який кодували індексом  $x_2$ ;
- радіус сфери  $r_c$ , який кодували індексом  $x_3$ .

в) крутного моменту калібрування ГСЗ на крок:

- ширина стрічки  $B_0$ , яку кодували індексом  $x_1$ ;
- кута нахилу клина  $\alpha$ , який кодували індексом  $x_2$ ;
- товщина витка  $H_0$ , яку кодували індексом  $x_3$ ;

г) тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів:

- глибина різання прохідним різцем  $t$ , мм, яку кодували індексом  $x_1$ ;
- подача прохідного різця  $S$ , який кодували індексом  $x_2$ ;
- швидкість різання  $V$ , яку кодували індексом  $x_3$ .

Таким чином, при реалізації експериментальних досліджень з визначення моменту навівання гвинтової заготовки з обертовою втулкою, зусилля утворення сфери, крутного моменту під час калібрування на крок ГСЗ та тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів лабораторних установок, було вибрано апроксимуючі математичні моделі у вигляді функціональної залежності  $M_{sz} = f_n(x_1, x_2, x_3)$   $P_f = f_z(x_1, x_2, x_3)$ ,  $M_{кр} = f_k(x_1, x_2, x_3)$   $P_z = f_z(x_1, x_2, x_3)$  і порядок проведення був таким:

- заcodування вхідного фактору,
- розробка таблиць вхідного фактору, розраховано верхня і нижня межа рівня варіювання окремого фактору та інтервал його варіювання;
- отримання кількості експериментальних досліджень однієї повторності;
- отримання план-матриці з проведення експериментальних досліджень;
- розробка рандомізаційної план-матриці;
- проведення експериментальних досліджень згідно план-матрицею;
- обчислення експериментальних досліджень з одержанням оптимізаційних рівнянь регресії з одержанням залежності та їх коефіцієнтів;
- здійснення відтворювання експериментальних даних;
- обчислення значимих коефіцієнтів регресії;
- проведення перевірки адекватності математичних моделей експериментальному процесу;
- побудова графо-аналітичних залежностей експериментальних досліджень і висновків.

Для планування експериментів [60] використано трифакторний експеримент на трьох рівнях варіювання вхідними факторами типу ПФЕ  $3^3$  які дозволили побудувати план-матрицю умовних значень верхнього, нижнього та нульового рівнів варіювання факторів, з кодуванням +1, -1, 0, тобто

Приводили до єдиної системи розрахунків переходу від дійсних значень до кодованих в процесі проведення експериментів змінні незалежні фактори неоднорідні та мають різні одиниці вимірювання, а числа, що виражають значення цих факторів – різні.

Здійснювали взаємо зв'язок кодованих  $x_i$  та натуральних  $X_i$  змінних факторів використовували залежність [2]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3.1)$$

де  $X_{i0}$  – натуральне значення і-го фактору на нульовому рівні;  
 $\Delta X_i$  – інтервал варіювання і-го фактору.

Багатофакторні експерименти здійснювали на трьох рівнях варіювання факторів. Середнє значення кожного вхідного фактору називали Нульовим значенням рівня за залежністю [2]:

$$X_0 = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}, \quad (3.2)$$

де  $X_0$  – числове значення нульового рівня вхідного фактору;  
 $X_{max}$  – числове значення верхнього рівня вхідного фактору;  
 $X_{min}$  – числове значення нижнього рівня вхідного фактору.

Отримання інтервалів варіювання факторів[2]:

$$\Delta X_i = \frac{X_{max} - X_{min}}{2}. \quad (3.3)$$

Для побудови план-матриці експериментальний досліджень встановлювали умовні позначення верхніх, нижніх та нульових рівнів варіювання факторів, а саме +1, -1, 0 [60].

Дослідження проводили для крутного моменту навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою  $M_{зв}$ , Н $\ominus$ М; зусилля утворення сферичної втулки секції робочого органа  $P_f$ , Н, крутного моменту калібрування ГЗ на крок  $M_{кр}$ , Н $\ominus$ М та тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із заготовки сталь 08кп та Ст 3 ГОСТ 1050-90 [41].

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання наведено у табл. 3.2 для моменту навивання навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою, табл. 3.3 для зусилля утворення сферично втулки секції робочого органа, табл. 3.4 для крутного моменту калібрування ГЗ на крок та табл. 3.5 для

тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів.

Після закодування вхідного фактору будували план-матрицю багатофакторних експериментів типу ПФЕ  $3^3$  для кількості дослідів  $N = P^k$ , де  $P$  – кількість рівнів варіювання,  $k$  – кількість діючих вхідних факторів у експерименті, наведені для експериментальних досліджень моменту навивання навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою, зусилля утворення сферично втулки секції робочого органа, для крутного моменту калібрування ГЗ на крок та величини тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів відповідно у табл. 3.5.

Таблиця 3.2.

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання для проведення експериментальних досліджень моменту навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою

Фактори	Позна-чення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур./кодовані		
	натур.	код.				
Товщина заготовки $H_0$ , мм	$H_0$	$x_1$	1	3/(+1)	2/(0)	1/(-1)
Зовнішній радіуса оправки $R$ , мм	$R$	$x_2$	10	60/(+1)	50/(0)	40/(-1)
Ширина заготовки $B_0$ , мм	$B_0$	$x_3$	5	30/(+1)	20/(0)	10/(-1)

Таблиця 3.3.

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання для проведення експериментальних досліджень зусилля утворення сферичної втулки секції робочого органа

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур./кодовані		
	натур.	код.				
Товщина заготовки $s$ , мм	$H_0$	$x_1$	0,25	1,7/(+1)	1,45/(0)	1,2/(-1)
Діаметр заготовки $D$ , мм	$D$	$x_2$	5	50/(+1)	45/(0)	40/(-1)
Радіус сфери $r_c$ , мм	$r_c$	$x_3$	5	30/(+1)	25/(0)	20/(-1)

Таблиця 3.4.

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання для проведення експериментальних досліджень крутного моменту калібрування ГСЗ на крок

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур./кодовані		
	натур.	код.				
Ширина заготовки $B_0$ , мм	$B_0$	$x_1$	10	30/(+1)	20/(0)	10/(-1)
Кута нахилу клина $\alpha$ , град	$\alpha$	$x_2$	10	30/(+1)	20/(0)	10/(-1)
Товщина заготовки $H_0$ , мм	$H_0$	$x_3$	15	3/(+1)	2/(0)	1/(-1)

Результати кодування факторів та вибору рівнів їх варіювання представлено у табл. 3.5. Формування табл. 3.5. проведено на основі попередніх даних проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин.

Таблиця 3.5

Результати вибору рівнів варіювання та кодування факторів при встановленні величини тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Глибина різання прохідним різцем $t$ , мм	$t$	$x_1$	0,25	1 (+1)	0,75 (0)	0,5 (-1)
Подача прохідного різця $S$ , мм/об	$S$	$x_2$	0,1	0,3 (+1)	0,2 (0)	0,1 (-1)
Швидкість різання $V$ , м/хв	$V$	$x_3$	40	180 (+1)	140 (0)	100 (-1)

При цьому параметри оптимізації одержували внаслідок апроксимуючих математичних моделей квадратного полінома, який дає можливість описати реальні експериментальні дослідження:

$$\begin{aligned}
 Y = \eta = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + \\
 & + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2,
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

де  $\eta$  – експериментальні результати моменту навівання  $N_{\text{ом}}$ , зусилля  $N$ , крутного моменту при калібруванні  $N \cdot m$ , сили різання  $N$ ;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  – коефіцієнти регресії вхідних факторів  $x_i$ ;

$x_1, x_2, x_3$  – вхідні закодовані фактори.

Для необхідної кількості вимірів показників, проводили достовірну оцінку експериментальних результатів, які контролювалися (повторність дослідів), та визначалися з відомою методикою, [2], внаслідок чого результати одержували у трикратній повторності.

Дані коефіцієнти апроксимуючого полінома, одержано у вигляді повного квадратичного рівняння та визначалися за загальними залежностями [60]:

- вільний член  $b_0$  і коефіцієнти  $b_i$   $i$ -го фактору:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u}{N} ; \quad (3.5)$$

- коефіцієнти взаємодії  $b_{ij}$ :

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{N} , \quad (3.6)$$

де  $x_{iu}$  – значення кодової змінної у відповідному стовпці плану експерименту;

$\bar{y}_u$  – середній результат  $u$ -го дослідів;

$u$  – порядковий номер дослідів;

$i$  – номер фактору;

$j, k$  – номер фактору, відмінного від  $i$ -го;

$N$  – кількість проведених експериментів.

Таблиця 3.6.

Умовна план-матриця експерименту типу ПФЕ  $3^3$  для  $P_f = f(s, D, r_c)$ ,  
 $M = f(B_0, \alpha, H_0)$ , та  $M = f(B_0, R, H_0)$ ,  $P_z = f(t, S, V)$ .

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У			Середні значення, У
									повторюваність			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$U_{\text{сер.}}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	У11	У12	У13	У1с
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	У21	У22	У23	У2с
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	У31	У32	У33	У3с
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	У41	У42	У43	У4с
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	У51	У52	У53	У5с
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	У61	У62	У63	У6с
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	У71	У72	У73	У7с
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	У81	У82	У83	У8с
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	У91	У92	У93	У9с
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	У10	У10	У10	У10с
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	У11	У11	У11	У11с
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	У12	У12	У12	У12с
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	У13	У13	У13	У13с
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	У14	У14	У14	У14с
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	У15	У15	У15	У15с
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	У16	У16	У16	У16с
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	У17	У17	У17	У17с
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	У18	У18	У18	У18с
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	У19	У19	У19	У19с
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	У20	У20	У20	У20с
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	У21	У21	У21	У21с
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	У22	У22	У12	У22с
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	У23	У23	У23	У23с
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	У24	У24	У24	У24с
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	У25	У25	У25	У25с
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	У26	У26	У26	У26с
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	У27	У27	У27	У27с



Значимість коефіцієнта рівняння регресії  $b_i$  перевіряли за критерієм Ст'юдента та визначалися у певній послідовності [127]:

- визначали дисперсію похибок дослідів ПФЕ:

$$S_u^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{uj} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.7)$$

де  $n$  – кількість повторюваних дослідів;  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

- одержували дисперсію з відтворенням досліда:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2, \quad (3.8)$$

- одержували похибку відтворення:

$$S_y = \sqrt{S_y^2}, \quad (3.9)$$

- одержана умова значимості коефіцієнтів  $b_i$  рівняння регресії:

$$b_{i(jk)} > \frac{t_T S_y}{\sqrt{Nn}}, \quad (3.10)$$

де  $t_T$  – значення коефіцієнтів Ст'юдента, яке визначали із таблиць в співвідношенні від ступеня відповідності  $f$  та рівня значимості  $\alpha$  [2, 60, 127].

Ступінь відповідності визначали за залежністю:

$$f = (n-1)N. \quad (3.11)$$

Якщо (3.10) не виконується, то такий коефіцієнт  $b_i$  рівняння регресії приймається рівним нулю, а відповідний член  $x_i$  рівняння регресії виключається.

Для вибраної математичної моделі здійснювалася перевірка адекватності за експериментальними даними, реалізація здійснювалася за  $F$ -критерієм Фішера в наступному [60]:

- отримана дисперсія адекватності:

$$S_{ag}^2 = \frac{n}{N - g'} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (3.12)$$

де  $N - g'$  – степень вільності дисперсії адекватності;

$g'$  – значимі коефіцієнти в рівняння регресії;

$\bar{y}_u$  – середнє значення відгуку в  $u$ -му досліді;

$\tilde{y}_u$  – результат відгуку в  $u$ -й точці плану, одержане за рівнянням регресії;

- отримали розрахунковий критерій відповідності Фішера  $F_p$ :

$$F_p = \frac{S_{ag}^2}{S_y^2}, \quad (3.13)$$

де  $S_y^2$  – дисперсія відтворення дослідів;

- отримано табличне значення критерію Фішера  $F_T$  за заданими значимості результату  $\alpha$  та двом степеням [60]:  $f_{ag} = N - g$  та  $f_y = N(n - 1)$ .

Вибрана математична модель здійснювали перевірку адекватності згідно залежності:

$$F_p < F_T. \quad (3.14)$$

Одержані значення  $F_p$  порівнювалися з табличними  $F_T$ . В наслідок чого здійснювали перевірку умови  $F_p < F_T(0,05, f_{ag}, f_y)$  тобто розрахункове результату  $F_p$  – критерія Фішера має бути меншим табличного  $F_T$  при 5 %-му рівні значимості, а числові значення степеня вільності дисперсії адекватні  $f_{ag} = N - g$  та числа степеня вільності дисперсії відтворення  $f_y = N(n - 1)$ , то залежність адекватності експериментальних результатів рівнянь регресії ПФЕ значимі.

Відповідно результатами експериментальних досліджень здійснювали в програмному продукті ПК „Statistica”, які дозволили здійснити статистичні розрахунки та аналіз результатів експериментальних досліджень, внаслідок чого побудували залежності поверхонь відгуку параметра оптимізації та двомірний переріз поверхонь відгуку результатів проведених експериментальних досліджень [2, 60, 127].

Апроксимацію проводили за відомими стандартними методиками, для одержання експериментальної ломаної лінії, яка будувалася за експериментальними дослідженнями і виформулою:

$$\Theta = \sum_{i=1}^N \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^N (m_{i_e} - m_{i_m})^2, \quad (3.15)$$

де  $\Theta = \varepsilon^2$  – величина “неузгодженості”;

$m_{i_e}$ ,  $m_{i_m}$  – теоретичне значення, яке отримане за емпіричною залежністю та експериментальних значень  $i$ -го досліджу.

### 3.5. Методика проведення та результати експериментальних досліджень з визначення деформаційних характеристик секційного гвинтового робочого органу

Для дослідження гвинтового секційного робочого органу проводилися експерименти з метою визначення крутного моменту із встановленням адекватності експериментальних досліджень [91].

Експериментальний зразок перевіряли на в дослідній машині КМ–50–1, яка приведена на рис. 3.14. Даний зразок навантажували за допомогою захвата через систему передач. Відповідно значення крутного моменту визначалася за коловою шкалою та фіксувалось кутовою шкалою відносно зміщення торцевих поверхонь ГСРО. За допомогою записуючого пристрою, який вмонтований в дану машину, виводили криву залежності моменту від кута повороту захвату.



Рис. 3.14. Загальний вигляд експериментальної машини КМ–50–1 з дослідними зразками ГСРО

Використовували для визначення моменту від кута повороту три варіанти експериментальних зразків, а саме одинарні гвинтові секції з 2-ма або 4-ма повздовжніми прутами.

Дані виготовлені експериментальні зразки наведено на рис. 3.15 а, б, в, з наступними конструктивними параметрами: діаметр зовнішній гвинтового

елемента  $D = 96$  мм; ширина спіралі  $B_0 = 30$  мм; товщина спіралі  $H_0 = 4$  мм; довжина секції робочого органу  $L = 100$  мм.



а)



б)



в)

Рис. 3.15. Експериментальні гвинтові зразки робочих органів:

- а) секція з двома прутками;
- б) секція з чотирма поздовжніми прутками;
- в) з'єднані секції між собою пружнім елементом

В процесі досліджень фіксувалось величина крутного моменту та кута закручування торцевих поверхонь секцій та дискретне навантаження гвинтової секції. Дослідження проводили доки на елементах ГСРО не виникли залишкові деформації, які наведені в розділі 5.

### 3.6. Висновки

1. Представлено програму експериментальних досліджень виготовлення ГСРО з врахуванням мети роботи і послідовності виконання етапів.

2. Розроблено методику використання стендового устаткування для проведення експериментальних досліджень процесу з визначенням зміни моменту навивання від зовнішнього радіуса спіралі, зусилля утворення сфери втулки для секції гвинтового робочого органа та процесу калібрування ГСЗ на крок в автоматизованому режимі з використанням програмного забезпечення PowerSuite v.2.5.0. частотного перетворювача Altivar

3 Наведена методика проведення багатofакторного експерименту досліджень типу ПФЕ  $3^3$ , яка передбачала визначення зусилля утворення сфери втулки від зміни величини товщини заготовки  $s$ , діаметр заготовки  $D$ , радіус сфери  $r_c$ , тобто  $P_f = f_z(s, D, r_c)$ .

4. Приведена методика багатofакторного експерименту досліджень типу ПФЕ  $3^3$ , яка передбачала визначення зміни моменту навивання навивання гвинтової заготовки з обертовою втулкою  $M_{з2}$  та крутного моменту  $M_{кр}$ , Н·м при процесі калібрування ГСЗ на крок  $M_{з2} = f(B_0, R, H_0)$  та  $M_{кр} = f(B_0, \alpha, H_0)$ .

5. Розроблено методику багатofакторного експерименту досліджень типу ПФЕ  $3^3$ , яка передбачала визначення величини тангенціальної сили різання  $P_z$  залежно від зміни трьох основних факторів: глибини різання  $t$  прохідним різцем, подачі  $S$  прохідного різця та швидкості різання  $V$ , тобто  $P_z = f(t, S, V)$ .

6. Оброблення результатів для проведення експериментів здійснено за загальновідомими методиками та методами статистичного оброблення з використанням кореляційного та регресійного аналізу, що дали змогу отримати емпіричні рівняння регресії повнофакторних експериментів.

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ СЕКЦІЙНОГО РОБОЧОГО ОРГАНА

#### 4.1. Результати експериментальних досліджень навивання гвинтових заготовок пристроєм з обертовою втулкою

Для підтверження теоретичних результатів проведено комплекс експериментів з дослідженням процесів навивання гвинтових заготовок пристроєм з обертовою втулкою із зовнішніми радіусами оправи  $r=40-60$  мм з профілів шириною до 30мм і товщиною 1-3 мм, що дозволить встановити закономірності з більшою точністю та особливістю процесу формоутворення гвинтових деталей, характеристику яких представлено у табл. 4.1. Для цих заготовок використовували матеріали: сталь 08 кп ( $\sigma_{TO}= 276$  МПа,  $\Pi=483$  МПа), Ст 3 ( $\sigma_{TO}=368$  МПа,  $\Pi= 526$  МПа) [80]. Пристрої встановлювали на токарному верстаті (рис. 3.8), частота обертання шпинделя верстату була мінімальною.

У зв'язку з особливістю навивання смуги на оправу в багатьох випадках одержували гвинтові заготовки з обмеженими параметрами. Результати досліджень свідчать, що згин здійснюється силою, плече прикладення якої достатньо велике  $l \geq (1..2)r$ . У випадку застосування оправи, яка забезпечує стійкість смуги по зовнішньому радіусі в процесі навивання, що відрізняється схемою прикладання згинальної сили ( $l \leq 0,5r$ ), можливо навивати гвинтові заготовки зі зведеною висотою  $b_{зв} = 12-15$  і більше. Крім того, застосування запропонованого способу обмежує такий параметр, як мінімальний радіус згину  $R_{min}$ . Залежно від ширини полоси і застосованого матеріалу  $R_{min} = (0,8-1,37)B_0$ . Більше значення  $b_{зв}$  відповідає меншій ширині  $B_0$  полочки, більшим радіусам оправи і пластичнішим матеріалам.

Навивання заготовок здійснювали за технологічними схемами, описаними в розділі 2, на пристроях з формувальними роликками, вісі яких розміщені відносно вісі оправи паралельно (рис. 3.8 - 3.10). Визначення згинальних моментів здійснювали за приведеною залежністю (2.21).

Для побудови математичної моделі, яка характеризує залежність згинального моменту процесу навивання гвинтових заготовок з обертовою втулкою від зміни зовнішнього радіуса оправи  $R$ , ширини заготовки  $B_0$  та товщини заготовки  $H_0$ , провели повнофакторний експеримент типу ПФЕ  $3^3$ , методику реалізації якого наведено в підрозділі 3.4. За отриманими результатами експериментів створювали таблицю результатів ПФЕ  $3^3$ , яку побудовано згідно табл. 3.2 і наведено в додатку В 1.

Побудову таблиці здійснювали наступним чином. Вхідними змінними факторами ПФЕ  $3^3$  приймали:

- товщина стрічки  $H_0$ , яку кодували індексом  $x_1$ ;
- зовнішній радіус оправки  $R$ , який кодували індексом  $x_2$ ;
- ширина стрічки  $B_0$ , яку кодували індексом  $x_3$ .

Після оброблення експериментальних даних отримано рівняння регресії в кодовій формі, які характеризують залежність зміни згинального моменту процесу навивання гвинтових заготовок пристроєм з обертовою втулкою від зміни зовнішнього радіуса оправи, ширини стрічки та товщини стрічки,  $M_{(Сталь\ 08кп)} = f(x_1; x_2, x_3)$ ,  $M_{(Ст3)} = f(x_1; x_2, x_3)$  відповідно для двох сталей в кодованих величинах:

$$M_{(x_1, x_2, x_3)}^{(сталь\ 08кп)} = -840,745 - 44,445x_1 + 28,694x_2 + 16,833x_3 - 1,944x_1^2 + 1,249x_1x_2 + 1,751x_1x_3 - 0,286x_2^2 + 0,141x_2x_3 - 0,303x_3^2 ; \quad (4.1)$$

$$M_{(x_1, x_2, x_3)}^{(Ст3)} = -453,706 - 38,333x_1 + 11,639x_2 + 18,889x_3 + 1,111x_1^2 + 0,833x_1x_2 + 1,917x_1x_3 - 0,097x_2^2 + 0,125x_2x_3 - 0,314x_3^2 . \quad (4.2)$$



де  $x_1$  – товщина стрічки, мм;  $x_2$  – зовнішній радіус оправки, мм;  $x_3$  – ширина стрічки, мм.

Характеристику факторів та значень їх рівнів для результатів значень наведено у табл. 4.1

Таблиця 4.1

Характеристика факторів та значення їх рівнів

Кодоване позначення фактора	Найменування фактора	Значення рівнів фактора
$x_1$	Товщина стрічки $H_0$ , мм	1-2-3
$x_2$	Зовнішній радіус оправки $R$ , мм	40-50-60
$x_3$	Ширина стрічки $B_0$ , мм	10-20-30

Для перевірки статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії та перевірку адекватності (відповідності) одержано теоретичний розподілу випадкової величини яке заводиться у рівняння регресії (4.1, 4.2) та реально описано методикою з підрозділу 3.4 за залежностями (3.7-3.14) експериментального процесу. Розрахункові значення проведених перевірок значущості коефіцієнтів регресії та адекватності моделі наведено в додатку В 2.

Згідно проведених розрахунків (додаток В.2) для значень коефіцієнтів рівняння (3.15) для сталі 08кп  $b_1 = -44,445$ ;  $b_{11} = -1,944$ ;  $b_{12} = 1,249$  та сталі Ст 3  $b_1 = -38,333$   $b_{11} = 1,111$ ;  $b_{22} = -0,097$  не виконується умова значущості згідно формули (3.10). Тоді кінцеве рівняння регресії, що відображає функціональну залежність зміни згинального моменту процесу навівання заготовки від величини зовнішнього радіуса оправки, товщини заготовки та ширини заготовки для сталі 08кп та Ст 3

$$M_{(H_0, R_0, B_0)}^{(сталь08кп)} = -938,710 + 31,195R_0 + 15,952B_0 + 2,19H_0B_0 - 0,28R_0^2 + 0,141R_0B_0 - 0,301B_0^2 ; \quad (4.3)$$

$$M_{(H,R,B)}^{(Cm^3)} = -288,606 + 3,583R + 18,221B_0 + 2,251H_0B + 0,125RB - 0,314B_0^2 \quad (4.4)$$

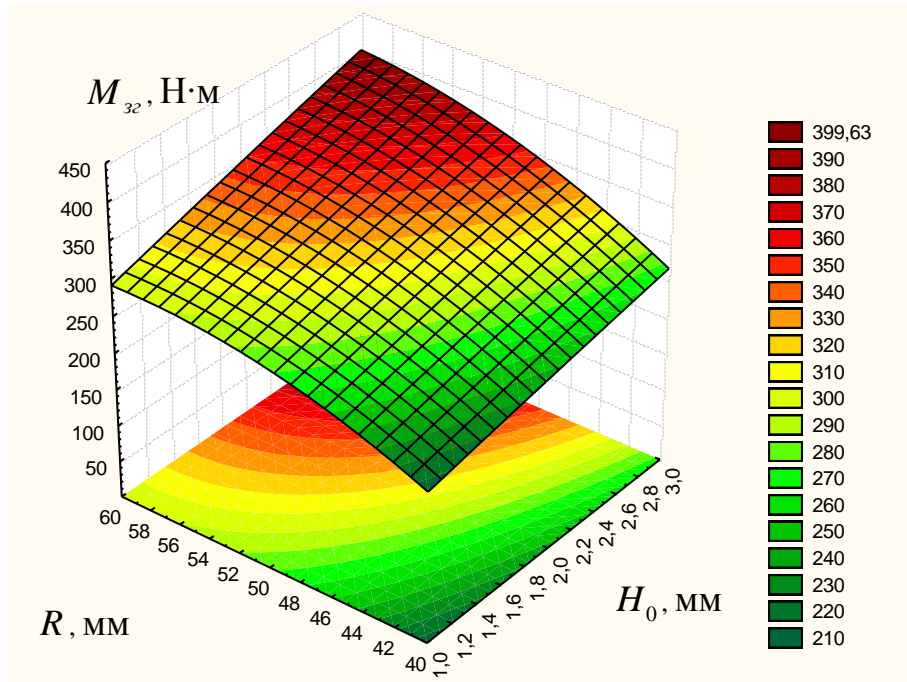
Отримана регресійна залежність (4.3, 4.4) може використовуватись для визначення крутного моменту навивання залежно від зовнішнього радіуса оправки, товщини стрічки та ширини стрічки в межах  $40 \leq R \leq 60$  (мм);  $1 \leq H_0 \leq 3$  (мм),  $10 \leq B_0 \leq 30$  (мм).

Перевірка за критерієм Фішера регресійних залежностей дозволяє стверджувати, що гіпотеза про адекватність моделі при п'ятивідсотковому рівні значущості не відкидається.

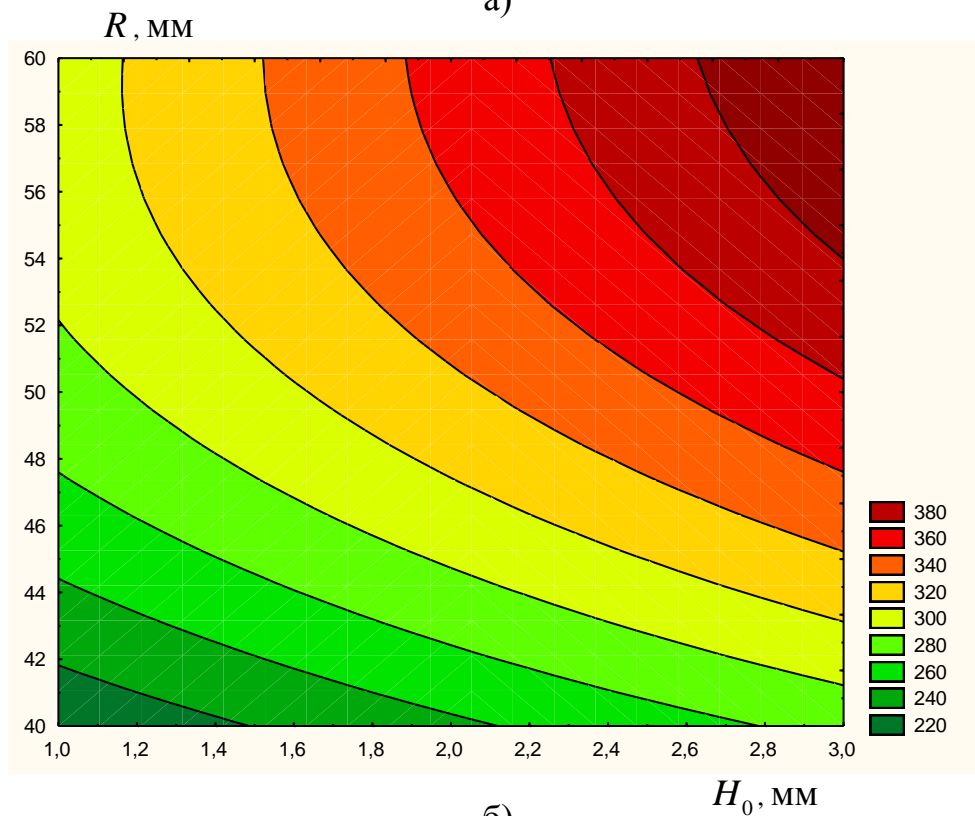
Для побудови графічних залежностей поверхонь відгуку параметру оптимізації й двомірний переріз поверхонь було наочного відображено результати експериментальних досліджень. Дані розрахунки результатів, проводилися згідно статистичних програм оброблення та аналізу результатів експериментальних досліджень для ПК.

Для побудови та аналізу залежностей зміни згинального моменту від ширини стрічки, зовнішнього радіуса оправки та товщини стрічки використовували пакет статистичної програми для ПК „Statistica”. Аналіз випадковості процесу оцінювали за стандартними методиками [135, 136].

На рис. 4.1- 4.6 наведено відповідно поверхні відгуку та двомірні перерізи поверхонь відгуку залежності згинального моменту навивання стрічки від зовнішнього радіуса оправки, товщини стрічки та ширини стрічки для сталі 08кп (рис. 4.1 - 4.3) та сталі Ст 3 (рис. 4.4 - 4.6).



а)



б)

Рис. 4.1. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності згинального моменту навивання  $M_{(H_0, R)}^{\text{Сталі 08кп}}$  на заготовці із сталі 08кп ( $B_0=20\text{мм}$ )

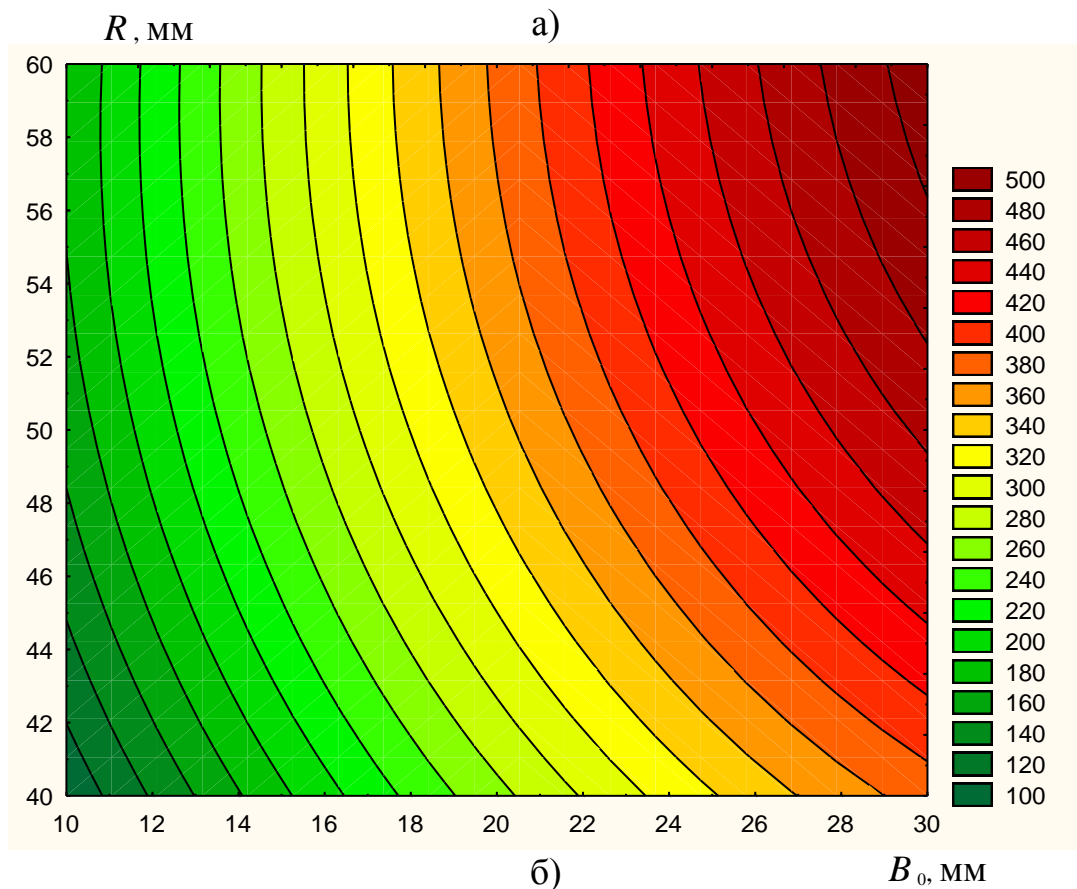
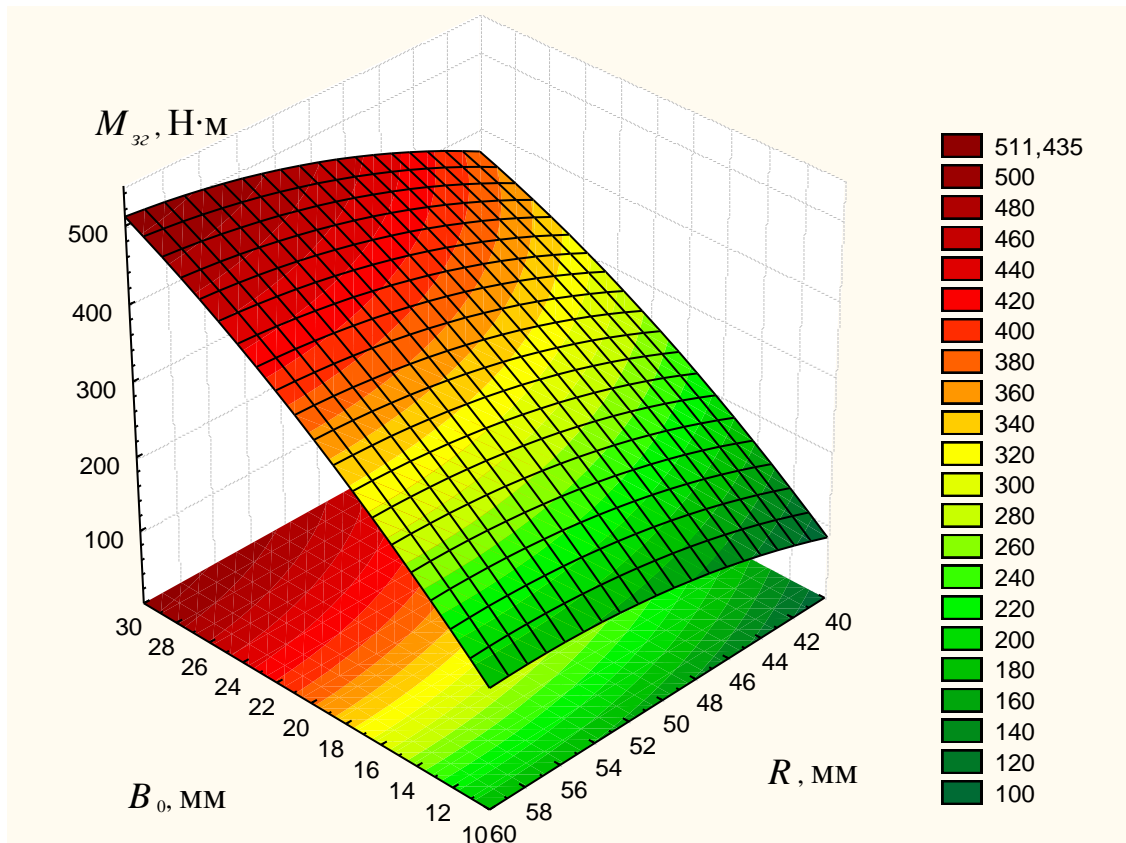
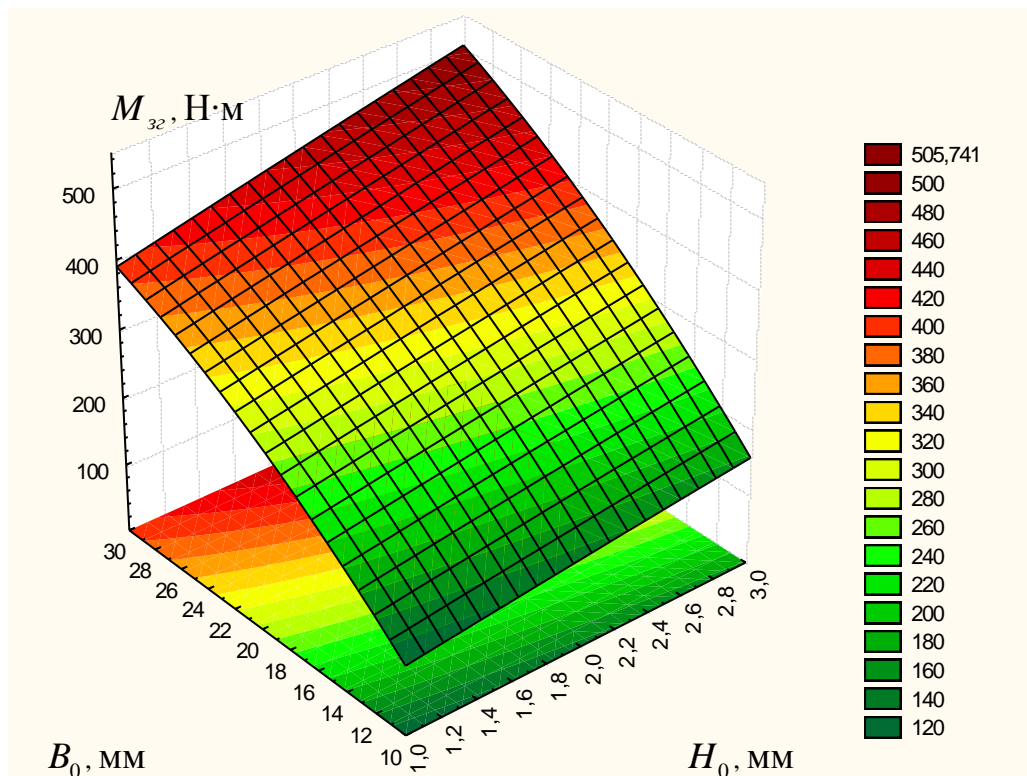
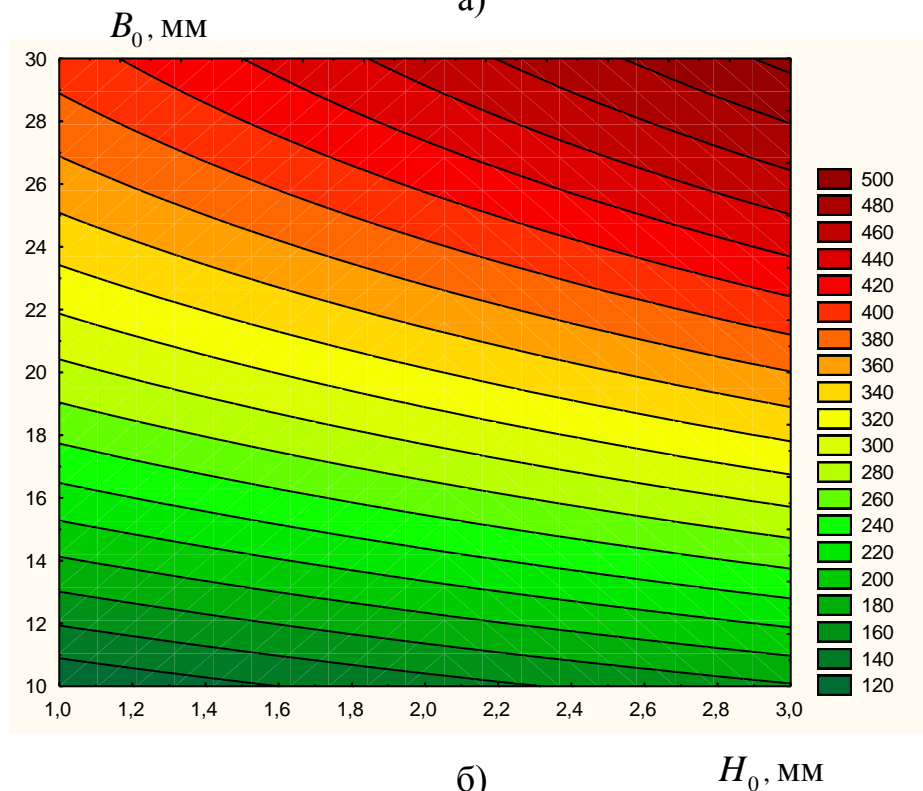


Рис. 4.2. Поверхня відгику (а) та двомірний переріз поверхні відгику (б) залежності згинального моменту навивання  $M_{(B_0, R)}^{\text{Сталі 08кп}}$  на заготовці із сталі 08кп ( $H_0=2\text{мм}$ )



а)



б)

Рис. 4.3. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності згинального моменту навивання  $M_{(H_0, B_0)}^{Сталі\ 08кп}$  на заготовці із сталі 08кп ( $R=50\text{мм}$ )

На рис. 4.4 – 4.6 зображено графічні залежності результатів згинального моменту процесу навивання заготовки для сталі Ст 3.

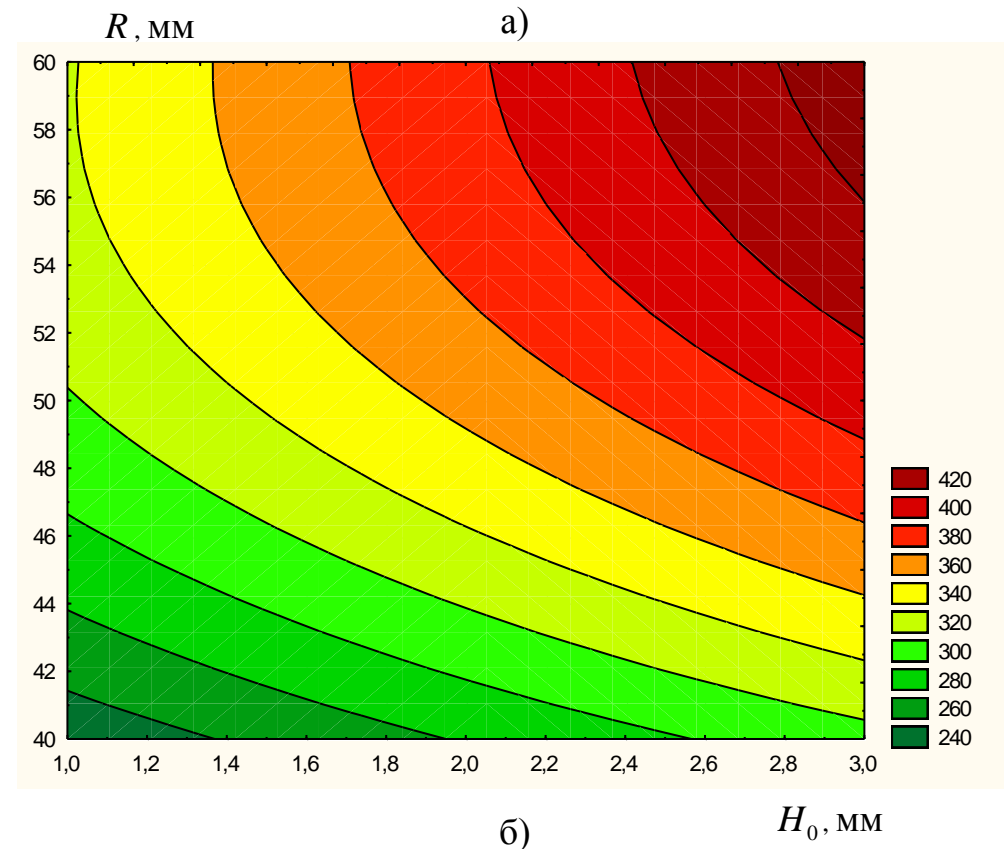
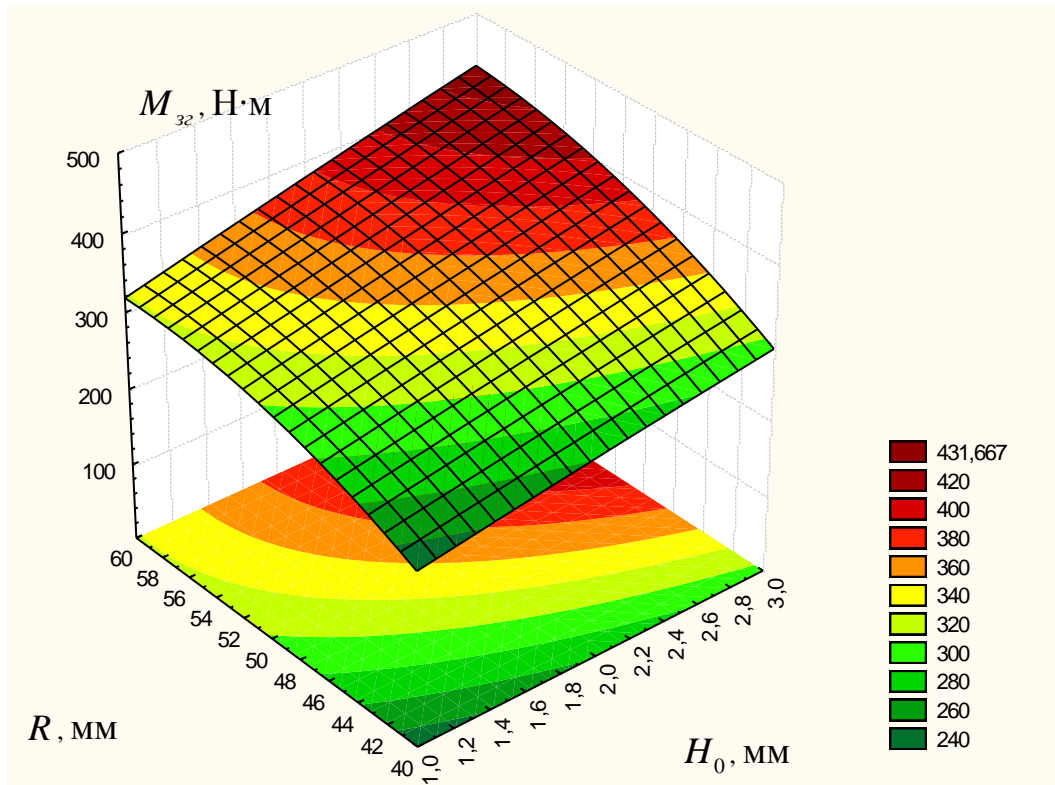


Рис. 4.4. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності згинального моменту навивання  $M_{(H_0, R)}^{Cm^3}$  на заготовці із Ст3 ( $B_0=20\text{мм}$ )

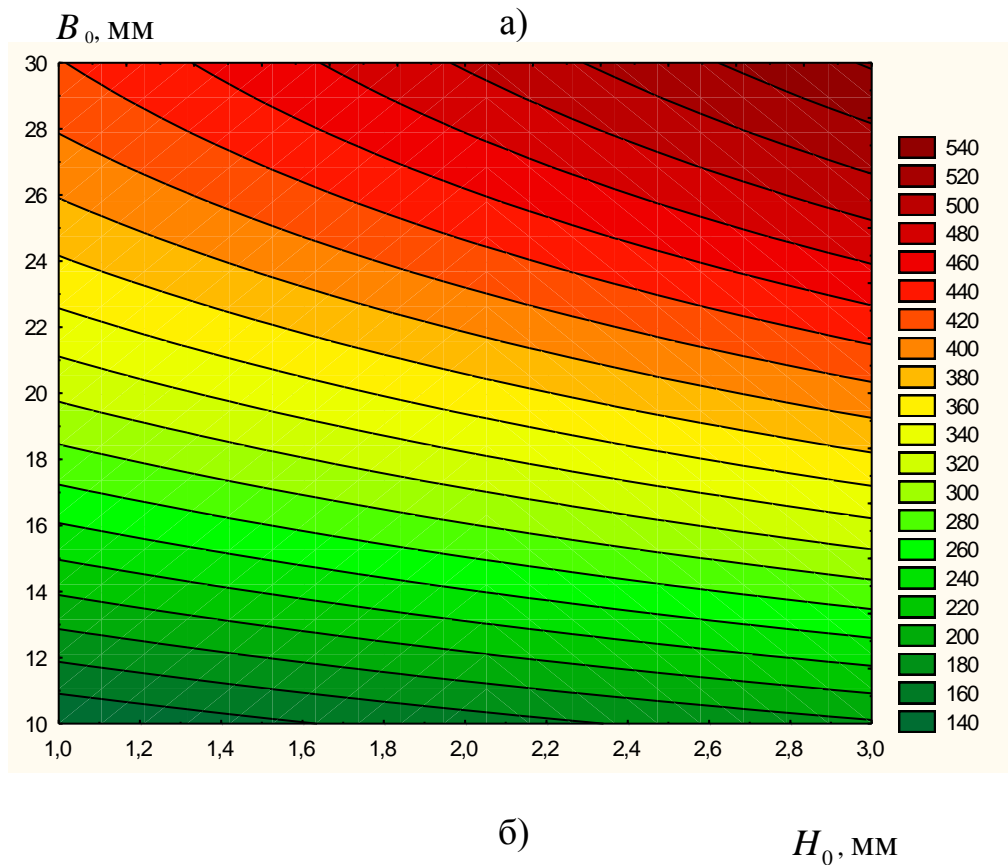
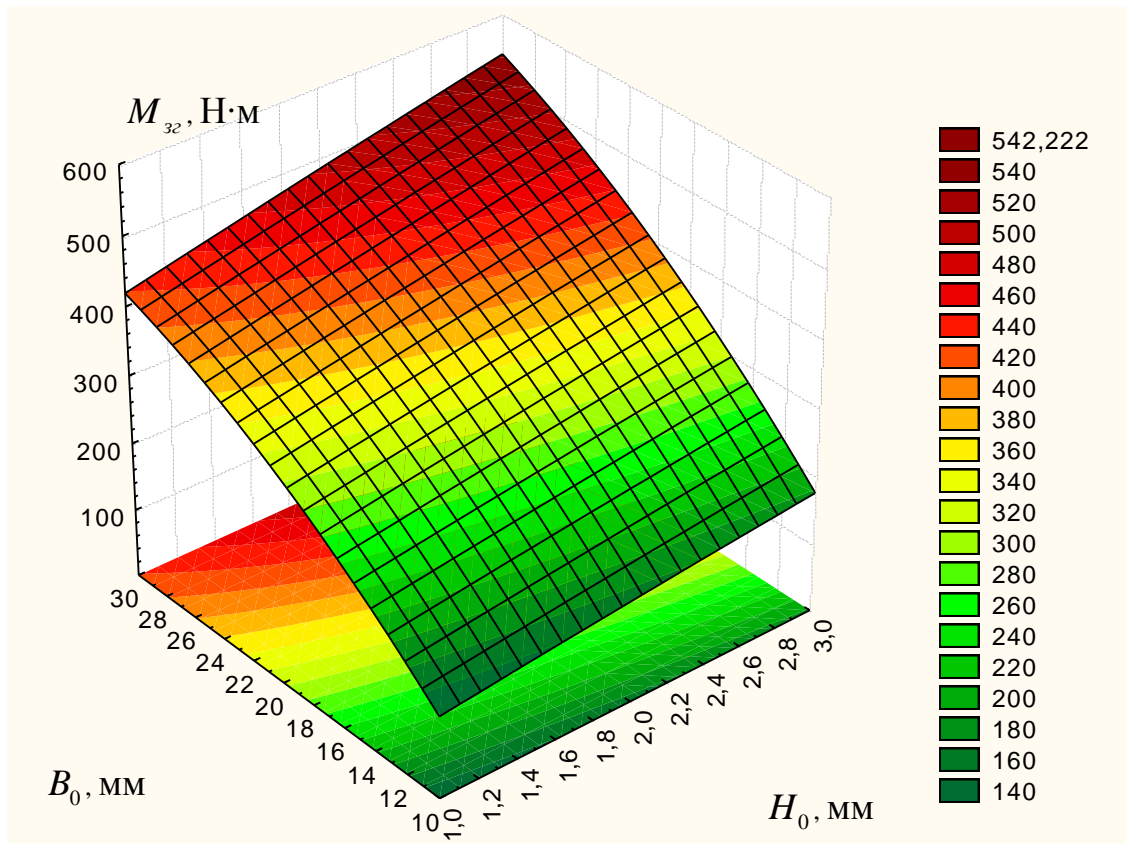
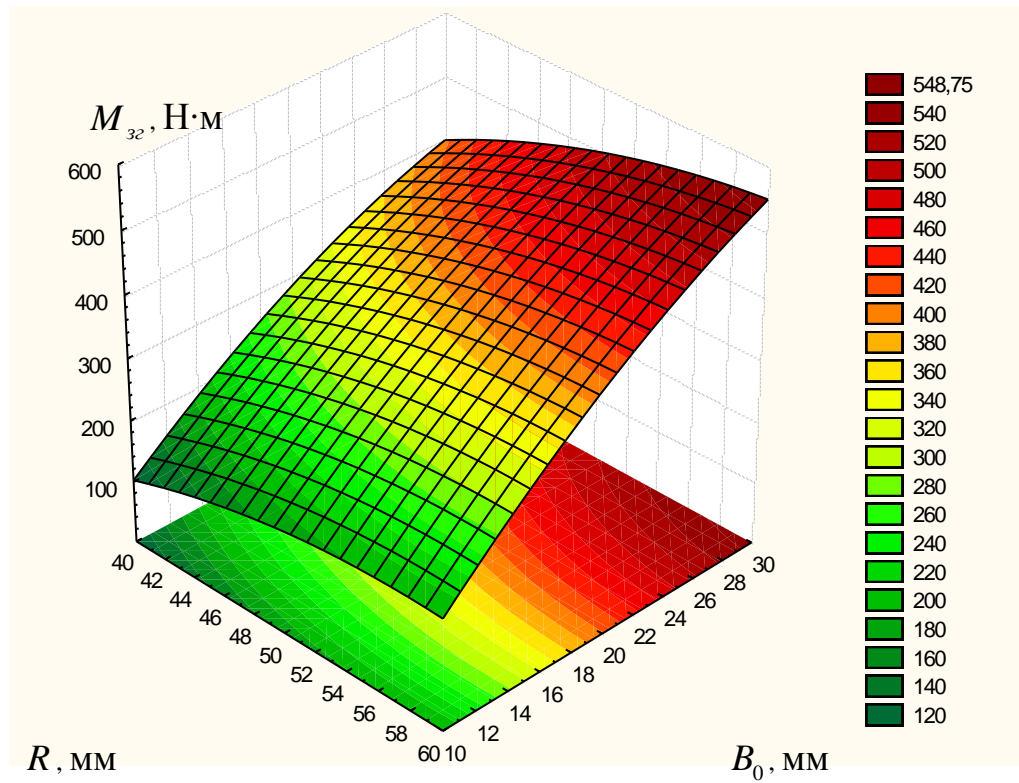
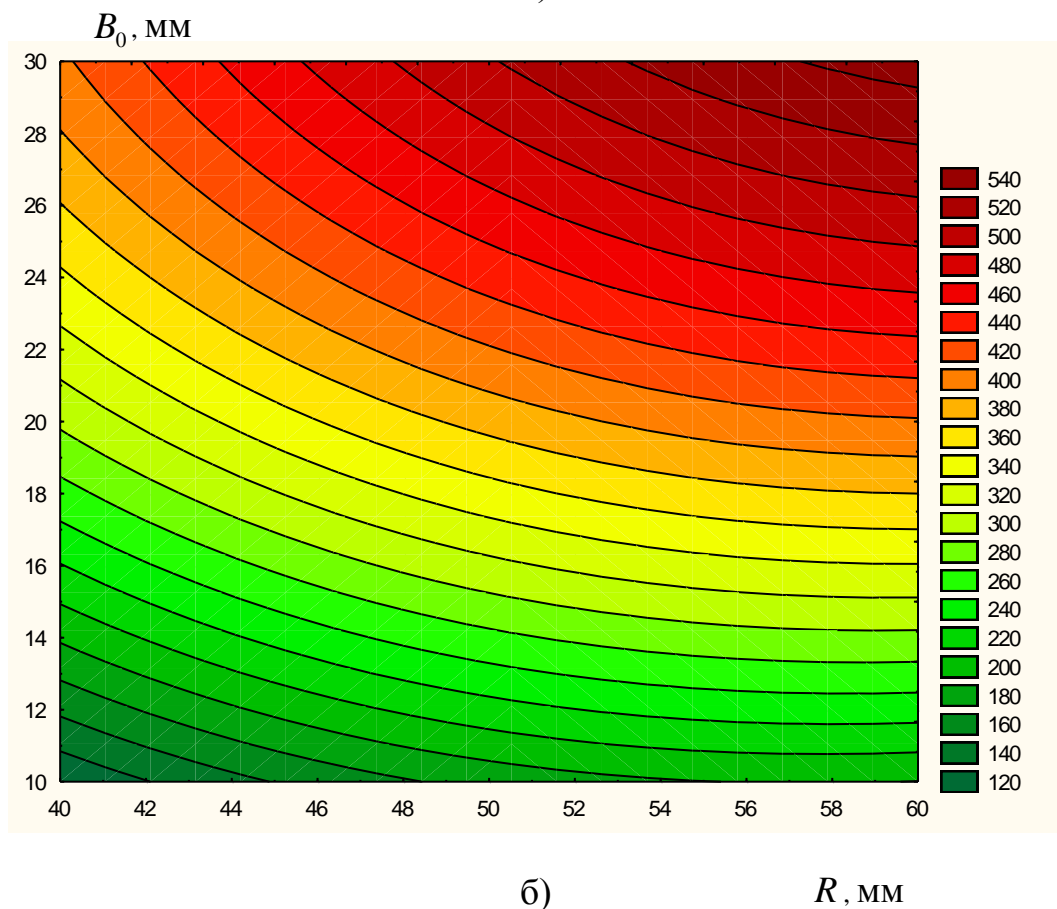


Рис. 4.5. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності згинального моменту навивання  $M_{(H_0, B_0)}^{\text{Cm}^3}$  на заготовці із СтЗ ( $R=50\text{мм}$ )



a)



б)

Рис. 4.6. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності згинального моменту навивання  $M_{(R,B_0)}^{Cm^3}$  на заготовці із Ст3 ( $H_0=2\text{мм}$ )



З даних графічних залежностей 4.1–4.3 видно, що для сталі 08кп при  $H_0=2\text{мм}$ ,  $R=50\text{мм}$  і зміні  $B_0$  у межах 10-30мм згинальний момент навивання набуває значень 399-511Н·м; для сталі Ст 3 згинальний момент навивання зростає в 1,07 рази та знаходиться в межах від 431Н до 548Н·м при зміні  $H_0=2\text{мм}$ ,  $R=50\text{мм}$  та зміні  $B_0$  у межах 10-30мм.

Встановлено, що під час проведення процесу навивання з використанням мастила суттєво момент внаслідок чого енергетичні витрати на формоутворення зменшується. Для пристроїв неперервного навивання особливо подача мастила у зону піднімання витка по напрямній втулці та на ділянці розгинання спіралі є ефективна у разі необхідності та за наявності відповідного механізму.

#### **4.2. Результати експериментальних досліджень виготовлення сферичної втулки**

Для отримання багатofакторного експерименту одержано цілий ряд досліджень згідно яких здійснювали за відомою методикою визначали залежність зусилля утворення сферично втулки від величини товщини заготовки, діаметр заготовки, радіуса сфери.

Зусилля утворення сферичної втулки визначено за допомогою пристроїв і способів, описаних в розділі 3. В технологічному процесі використовували для експерименту оброблюваний матеріал – Сталь 08кп. Дані експеримент проводили не менше 3 разів та для незмінного фактору, внаслідок чого визначали середнє значення результату для подальших статистичних результатів оброблення експериментів.

Для одержання теоретичних викладок, які оперуються закономірностями зміни зусилля утворення сферичної втулки в заготовках із матеріалу: Сталь 08кп від товщини заготовки, діаметра заготовки, радіуса сфери здійснено лабораторні експериментальні дослідження, згідно відомої методики яка наведена у підрозділі 3.4.

Отримані значення експериментального масиву даних заводяться таблицю результатів багатофакторного експерименту типу ПФЕ  $3^3$  для побудови математичної моделі з всього напрацьованого згідно табл. 3.3 (підрозділ 3.4).

Побудову даних таблиць проведено наступним чином. Вхідними змінними факторами ПФЕ  $3^3$  прийнято:

- товщина заготовки  $s$ , яку кодували індексом  $x_1$ ;
- діаметр заготовки  $D$ , який кодували індексом  $x_2$ ;
- радіус сфери  $r_c$ , який кодували індексом  $x_3$ .

Числові значення зусилля утворення сферичної втулки  $P$  залежно від параметрів процесу у вигляді масиву експериментальних даних наведено в табл. 4.3. Обробку отриманого експериментального масиву даних зусилля утворення сферичної втулки  $P$ , яку наведено в таблиці 4.2, і аналіз отриманих результатів провели згідно з методикою, наведеною в пункті 3.4 розділу 3 дисертаційної роботи.

Характеристику факторів та значень їх рівнів для результатів значень наведено у табл. 4.2

Таблиця 4.2

Характеристика факторів та значення їх рівнів

Кодоване позначення фактора	Найменування фактора	Значення рівнів фактора
$x_1$	Товщина заготовки $s$ , мм	1,2-1,45-1,7
$x_2$	Діаметр заготовки $D$ , мм	40-45-50
$x_3$	Радіус сфери $r_c$ , мм	20-25-30

Згідно залежностей (3.5), (3.6) розраховано невідомі коефіцієнти регресії квадратного полінома за при цьому одержані результати коефіцієнтів регресії зведено у табл. 4.3.

Результати експериментальних досліджень зусилля утворення сферичної  
втулки

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У			Середні значення, У
									повторюваність			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$U_{\text{сер.}}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	3,5	3,7	3,3	3,5
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	4,0	4,4	4,2	4,2
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	4,0	3,9	4,1	3,9
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	4	4	4	4
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	4,7	4,9	4,5	4,7
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	4,4	4,4	4,4	4,4
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	4,0	4,1	3,9	3,9
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	4,5	4,5	4,5	4,5
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	4,0	4,4	4,2	4,2
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	4,7	4,9	4,5	4,7
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	5,15	5,3	5,0	5,15
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	5,0	5,1	4,9	4,9
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	5,0	5,4	5,2	5,2
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	6,8	6,8	6,8	6,8
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	6,0	6,6	6,3	6,3
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	5,0	5,4	5,8	5,4
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	6,0	6,4	6,8	6,4
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	5,9	5,9	5,9	5,9
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	4,5	4,5	4,5	4,5
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	5,0	5,6	5,3	5,3
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	5,0	5,1	5,2	5,1
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	5,1	5,1	5,1	5,1
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	6,3	6,3	6,3	6,3
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	5,5	5,6	5,7	5,6
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	5,4	5,6	5,8	5,6
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	5,3	5,3	5,3	5,3

Загальний вигляд рівняння регресії зусилля  $P_z$  утворення сферичної втулки залежно від зміни величини товщини заготовки, діаметра заготовки, радіуса сфери тобто  $P_{P(x_1, x_2, x_3)}^i = f(s, D, r_c)$  результат якого наведено у кодованих величинах типу ПФЕ 3<sup>3</sup>:

- для заготовок із сталі 08кп:

$$P_{(x_1, x_2, x_3)}^i = -11,86 - 2,26x_1 + 0,33x_2 + 0,53x_3 + 0,117x_1x_2 + 0,77x_1x_3 + 0,0068x_2x_3 - 1,034x_1^2 - 0,0066x_2^2 - 0,016x_3^2. \quad (4.5)$$

де  $x_1$  – кодоване значення величини товщини заготовки  $s$ ;

$x_2$  – кодоване значення діаметра заготовки  $D$ ;

$x_3$  – кодоване значення радіуса сфери  $r_c$ .

Таблиця 4.4

Значення коефіцієнтів рівнянь регресії

Коеф.	Сталь 08кп
$b_0$	-11,86
$b_1$	-2,26
$b_2$	0,33
$b_3$	0,53
$b_{12}$	0,117
$b_{13}$	0,07
$b_{23}$	0,0068
$b_{11}$	-1,034
$b_{22}$	-0,0066
$b_{33}$	-0,016

Оцінку статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії та перевірку адекватності (відповідності) отриманого теоретичного розподілу випадкових величин рівнянь регресії (4.5), реальному експериментальному

процесу проводили згідно методики, яка наведена у підрозділі 3.4.

Усі коефіцієнти рівняння регресії (4.5) є значущими. Відповідно у натуральних величинах (координатах) рівняння регресії (4.5) після перетворення та спрощення виразів прийнято в кінцевому вигляді:

- для заготовок із сталі 08:

$$P_{(s,D,r_c)} = -7,16 + 0,61r_c - 1,3s^2 + 0,122sD - 0,0032D^2 + 0,0073Dr_c - 0,016r_c^2. (4.6)$$

Отримане рівняння регресії (4.5) та регресійна залежність (4.6) можуть бути використані для визначення зусилля  $P$  утворення сферичної втулки залежно від величини товщини заготовки, діаметра заготовки, радіуса сфери у таких межах зміни вхідних факторів:

$$1,2 \leq s \leq 1,7 \text{ (мм)}; 40 \leq D \leq 50 \text{ (мм)}; 20 \leq r_c \leq 30 \text{ (мм)}.$$

Для визначення впливу основних кінематичних і геометричних показників на зміну зусилля утворення сферичної втулки в заготовках із матеріалу сталь 08кп використовували стандартне програмне забезпечення для ПК, за допомогою якого побудували графічне відтворення проміжних загальних регресійних моделей у вигляді квадратичних поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів зміни зусилля  $P$  утворення сферичної втулки в заготовках із матеріалу сталь 08кп як функцію від двох змінних факторів  $x_{i(1,2)}$  за постійного незмінного рівня відповідного третього фактора  $x_{i(3)} = const$ .

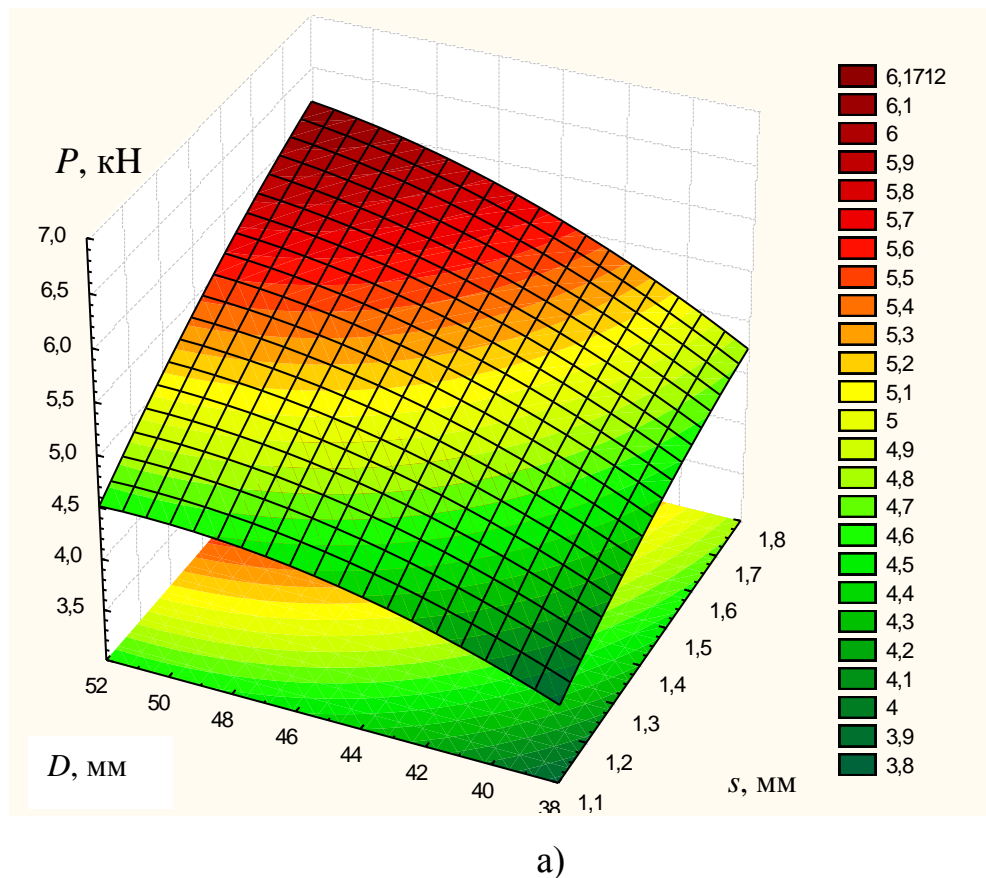
Аналіз наведеного регресійного рівняння показує, що основними факторами, які впливають на збільшення зусилля утворення сферичної втулки є фактори  $x_1$ ,  $x_3$ , ( $s$ ,  $r_c$ ), та комбінації цих факторів. Фактор  $x_3$  ( $D$ ) призводить до зменшення зусилля утворення сферично втулки.

Згідно отриманих рівнянь регресії побудовано поверхні відгуку та двомірні їх перерізи зусилля утворення сферичної втулки від зміни двох факторів для  $x_3 = const$ , наведені відповідно в підрозділі 4.2.

### 4.3. Графоаналітичне оброблення результатів експериментальних досліджень зусилля утворення сферично втулки на заготовках

Під час експерименту проводили дослідження зусилля  $P$  утворення сферичної втулки на заготовках із сталі 08кп. Для всіх факторів експеримент проведено в трьохкратній повторюваності, після чого визначено середнє значення результату.

Графічні значення результатів залежності зусилля  $P$  утворення сферичної втулки у заготовках із сталі 08кп з використанням «Statistica» наведено на рис. 4.7 – 4.9.



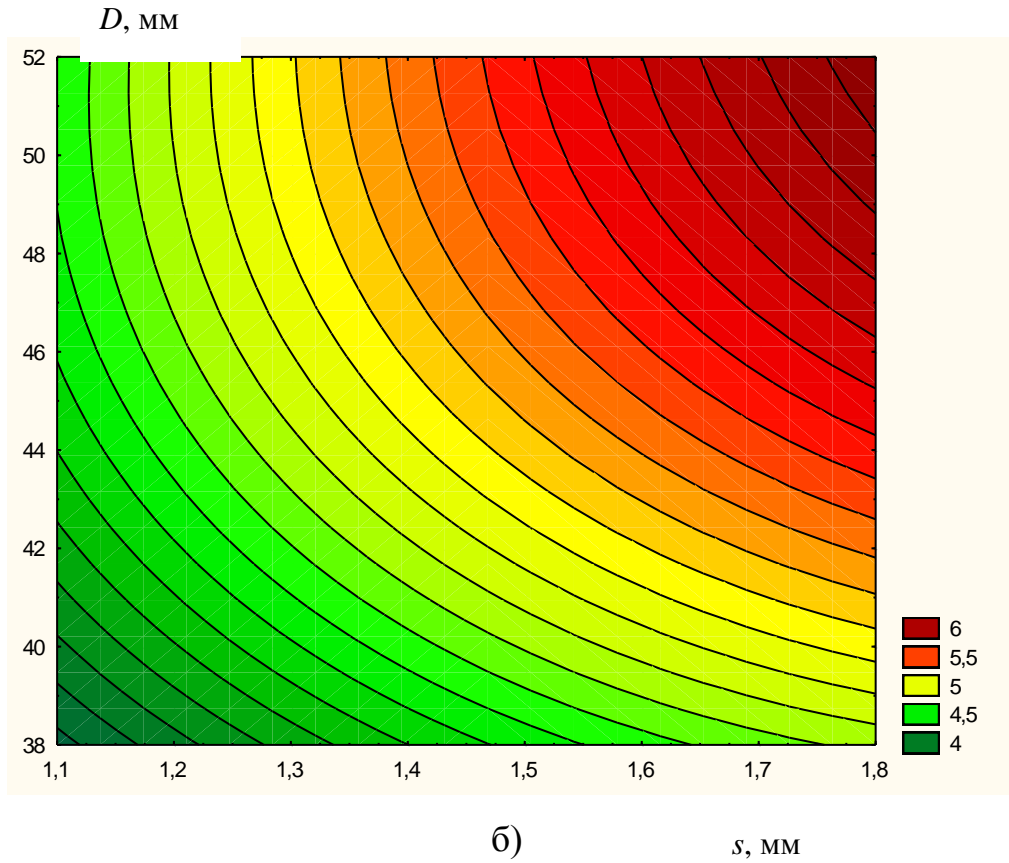
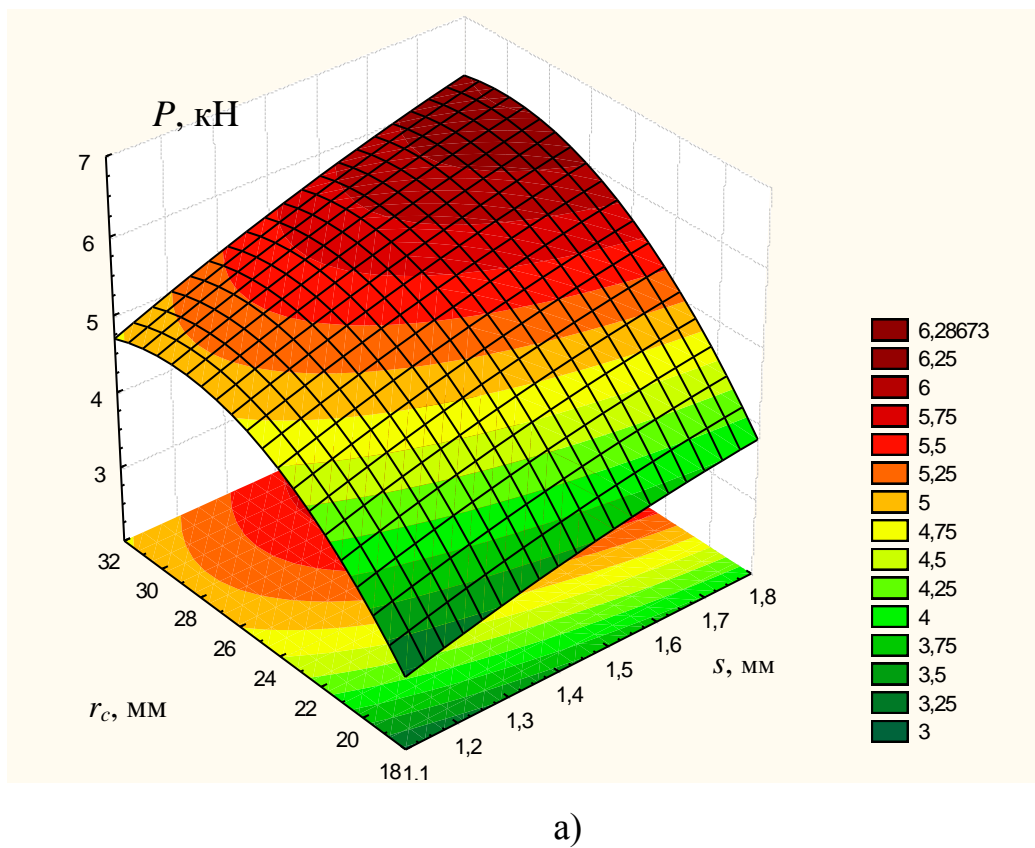


Рис. 4.7. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності зусилля утворення сферичної втулки  $P_{(s,D)}^{Сталі08кп}$  на заготовці із сталі 08кп ( $r_c=25\text{мм}$ )



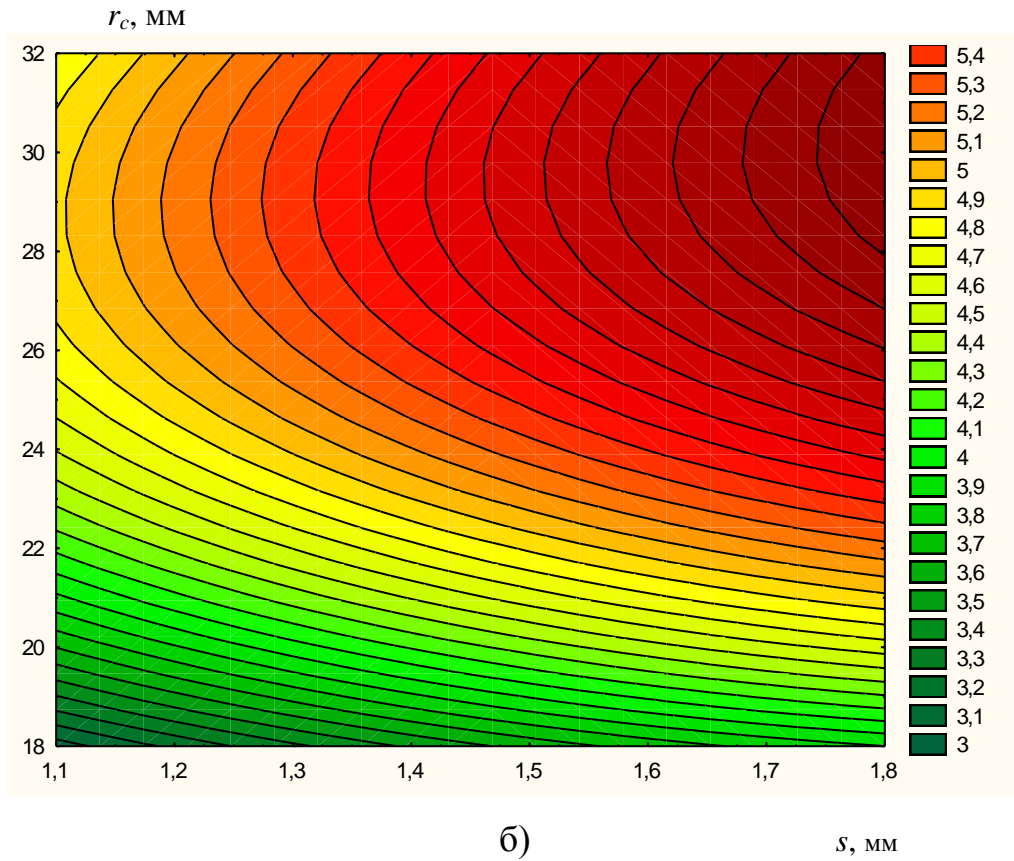
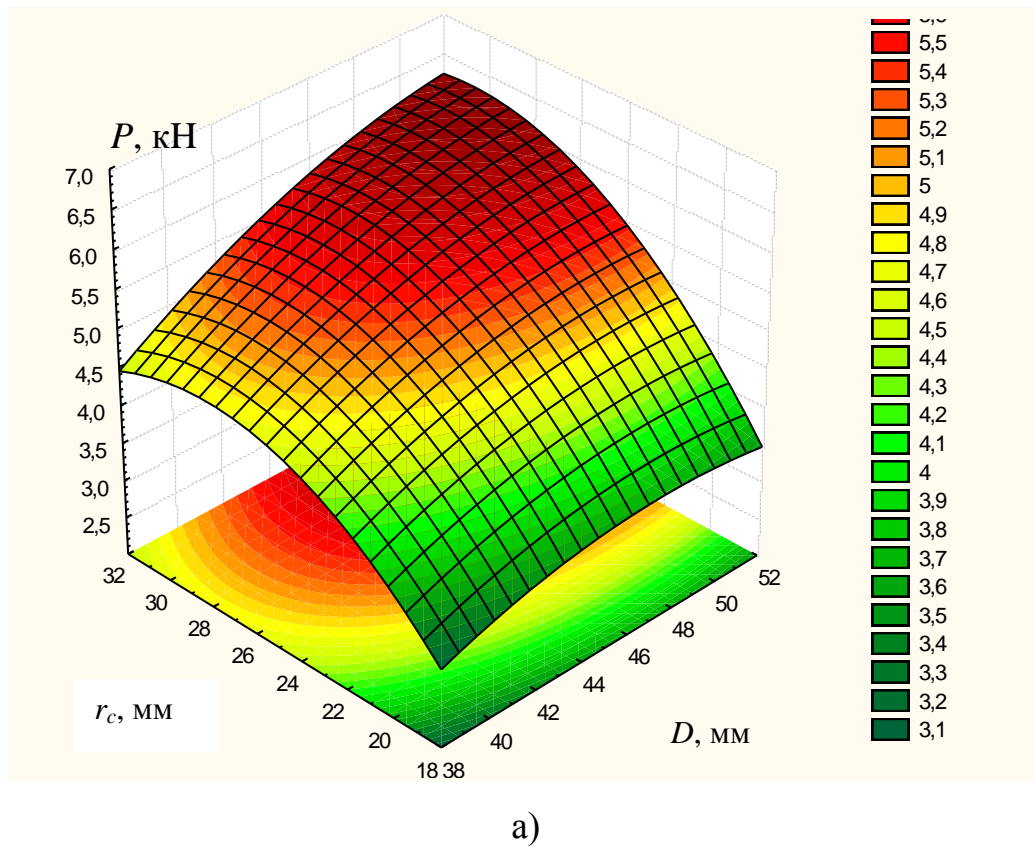


Рис. 4.8. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності зусилля утворення сферичної втулки  $P_{(s,r_c)}^{Сталі\ 08кп}$  на заготовці із сталі 08кп ( $D=45\text{мм}$ )





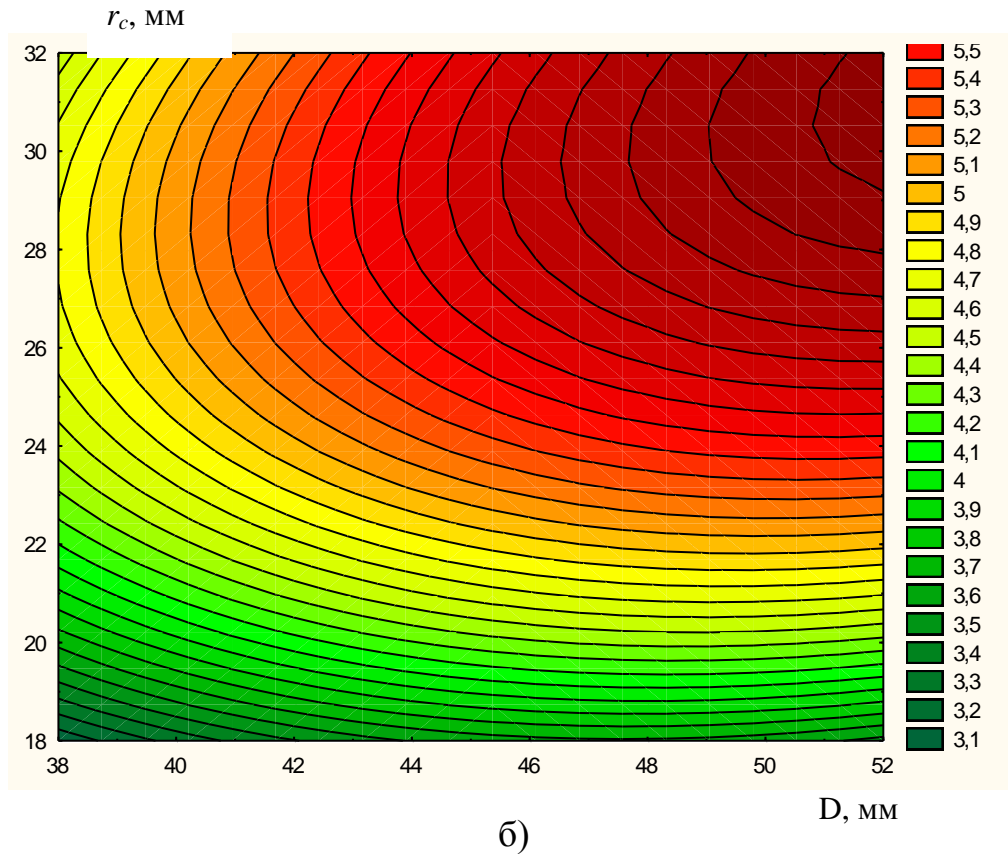


Рис. 4.9. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності зусилля утворення сферичної втулки  $P_{(D,r_c)}^{Сталі\ 08кп}$  на заготовці із сталі 08кп ( $s=1,45\text{мм}$ )

З рисунків 4.7 – 4.9 видно, що із збільшенням товщини заготовки, а також радіуса сфери зусилля зростає, а при збільшенні діаметра заготовки – спадає. Максимальне значення зусилля складає 6,28 кН для заготовок із сталі 08кп.

#### 4.4. Результати досліджень калібрування гвинтових робочих органів

На основі експериментальних досліджень перевірено адекватність теоретичних досліджень з визначення впливу матеріалу заготовки та її геометричних параметрів і параметрів клину на силові показники процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок.

Дослідження із визначення крутного моменту процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок проводились для заготовок із матеріалів: сталь 08 кп ( $\sigma_{TO} = 276\text{ МПа}$ ,  $\Pi = 483\text{ МПа}$ ) і Ст 3 ( $\sigma_{TO} = 368\text{ МПа}$ ,  $\Pi = 526\text{ МПа}$ );

що дозволило визначити аналітичні регресійні рівняння [80].

Проведено ряд експериментальних досліджень з використанням багатofакторного експерименту, в яких визначали крутний момент  $M$ , Н·м для процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок від зміни трьох основних факторів: ширини витка  $B_0$ , кута нахилу клина  $\alpha$  товщини витка  $H_0$  для матеріалу сталь 08кп. Процес калібрування витка гвинтової заготовки на крок заміряли за допомогою пристроїв і способів, описаних в розділі 3.

Визначено невідомі коефіцієнти регресії квадратичного полінома за формулами (3.5), (3.6) і отримані значення коефіцієнтів регресії зведено у табл. 4.5, а масив отриманих експериментальних даних для крутного моменту  $M_{кр}$ , Н·м наведено в додатку .

Характеристику факторів та значень їх рівнів для результатів значень наведено у табл. 4.5

Таблиця 4.5

Характеристика факторів та значення їх рівнів

Кодоване позначення фактора	Найменування фактора	Значення рівнів фактора
$x_1$	Ширина стрічки $B_0$ , мм	20-35-50
$x_2$	Кута нахилу клина $\alpha$ , град	10-20-30
$x_3$	Товщина стрічки $H_0$ , мм	2-4-6

Загальний вигляд рівнянь регресії крутного моменту  $M_{кр}$ , Н·м залежно від зміни ширина витка  $B_0$ , кута нахилу клина  $\alpha$  і товщини витка  $H_0$ , тобто  $M_{кр} = f_{(x_1, x_2, x_3)}(B_0, \alpha, H_0)$  для кодованих значень факторів матеріалу сталь 08кп має вигляд:

- для визначення крутного моменту калібрування

$$M_{кр(x_1, x_2, x_3)} = -14,056 + 0,17x_1 + 1,22x_2 - 2,32x_3 - 0,00000022x_1x_2 + 0,066x_1x_3 - 0,23x_2x_3 - 0,00012x_1^2 - 0,037x_2^2 + 1,06x_3^2, \quad (4.7)$$

де  $x_1$  – кодоване значення частоти обертання обкатного інструмента;  $x_2$  – кодоване значення часу обробки заготовки;  $x_3$  – кодоване значення величини перекриття поверхні гвинтової заготовки.

Отримані рівняння регресії (4.7 - 4.8) можуть бути використані для визначення залежності крутного моменту  $M_{кр}$ , Нм для процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок від зміни трьох основних факторів: від зміни ширини витка  $B_0$ , кута нахилу клина  $\alpha$  і товщини витка  $H_0$ , для матеріалу сталь 08кп.

Усі коефіцієнти є значимі, що відображаються у натуральних значеннях факторів залежностей (4.7 - 4.8) які мають вигляд:

- для визначення крутного моменту калібрування витка гвинтової заготовки на крок

$$M_{кр(B_0, \alpha, H_0)} = -18,21 + 1,27\alpha + 0,066B_0H_0 - 0,37\alpha^2 + 0,21\alpha H_0 + 0,81H_0^2; \quad (4.8)$$

Таблиця 4.6.

Значення коефіцієнтів рівнянь регресії для матеріалу сталь 08кп

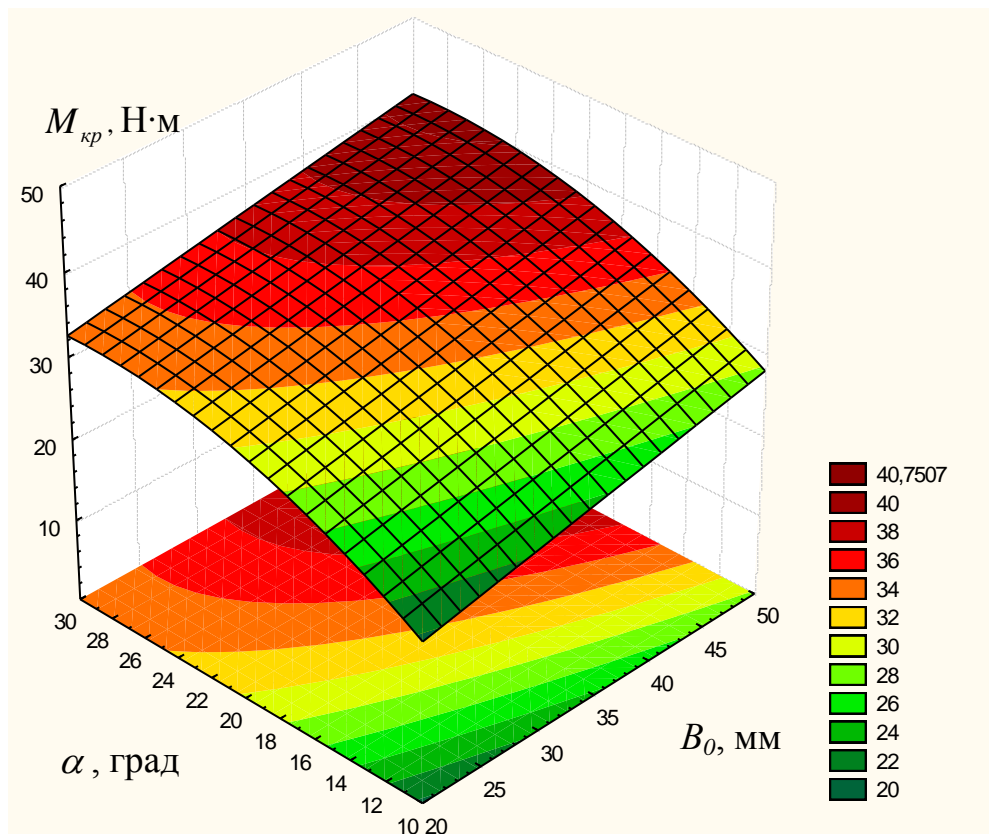
Коефіц.	Крутний момент $M_{кр}$ , $H \cdot м$
$b_0$	-14,056
$b_1$	0,17
$b_2$	1,22
$b_3$	-2,32
$b_{12}$	-0,00000022
$b_{13}$	0,066
$b_{23}$	0,23
$b_{11}$	-0,00012
$b_{22}$	-0,037
$b_{33}$	1,06

Отримане регресійне рівняння дало можливість використати програмний продукт Statistica для ПК та відтворити графічні залежності моделі у вигляді

квадратних поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів крутного моменту калібрування витка гвинтової заготовки на крок  $M_{кр}$ , Н·м як функція двох змінних факторів  $x_{i(1,2)}$  за незмінного рівня третього фактора  $x_{i(3)} = const$ .

#### 4.5. Графоаналітичне оброблення результатів експериментальних досліджень калібрування витка гвинтової заготовки на крок

Графічні значення результатів залежності крутного моменту калібрування витка гвинтової заготовки на крок  $M$ , Н·м, одержані з використанням «Statistica», наведено на рис. 4.10 – 4.13.



а)

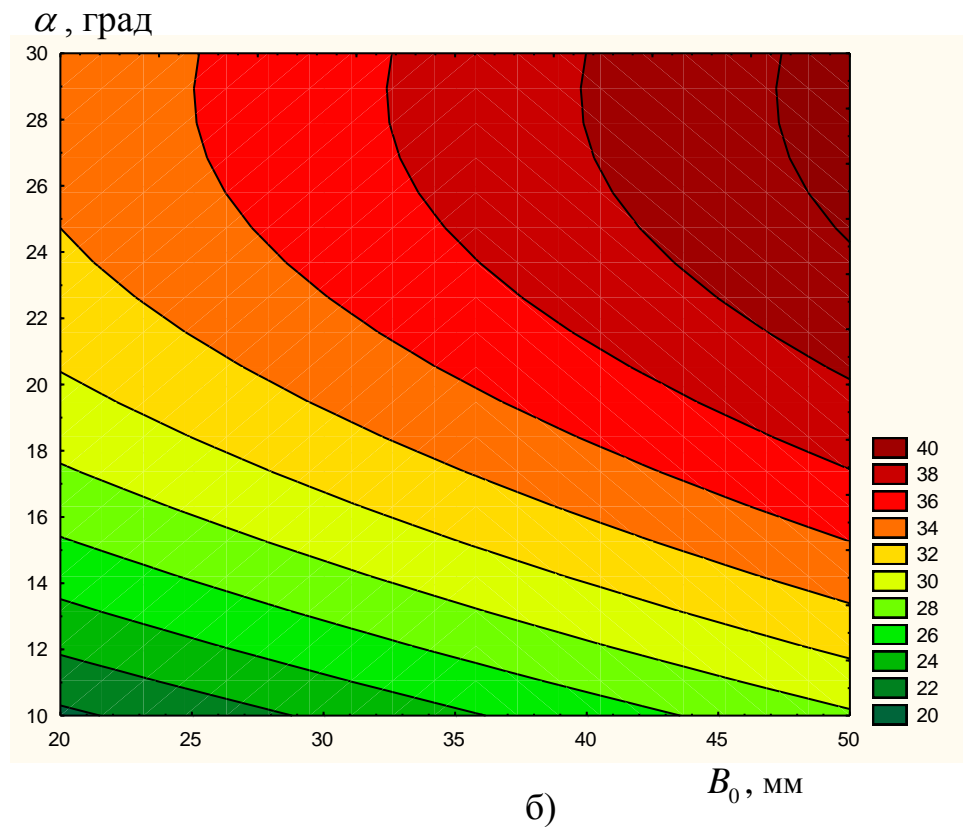
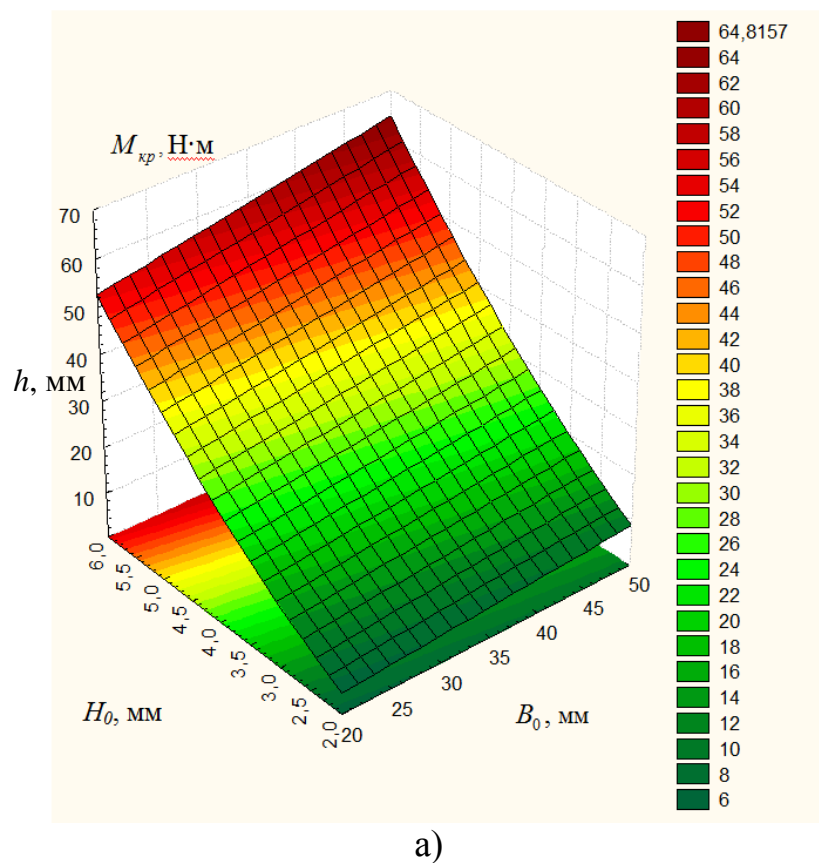
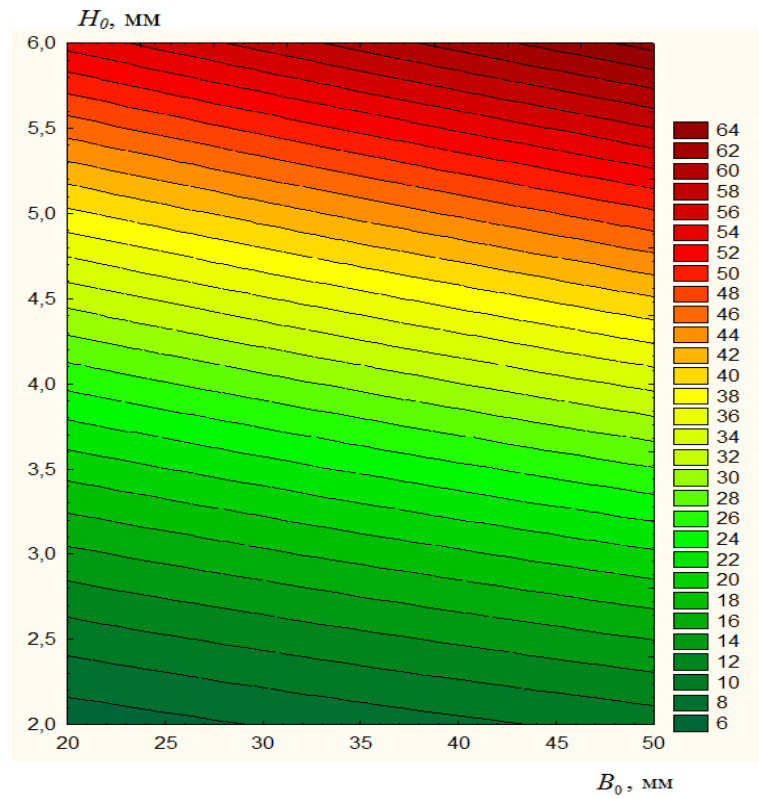


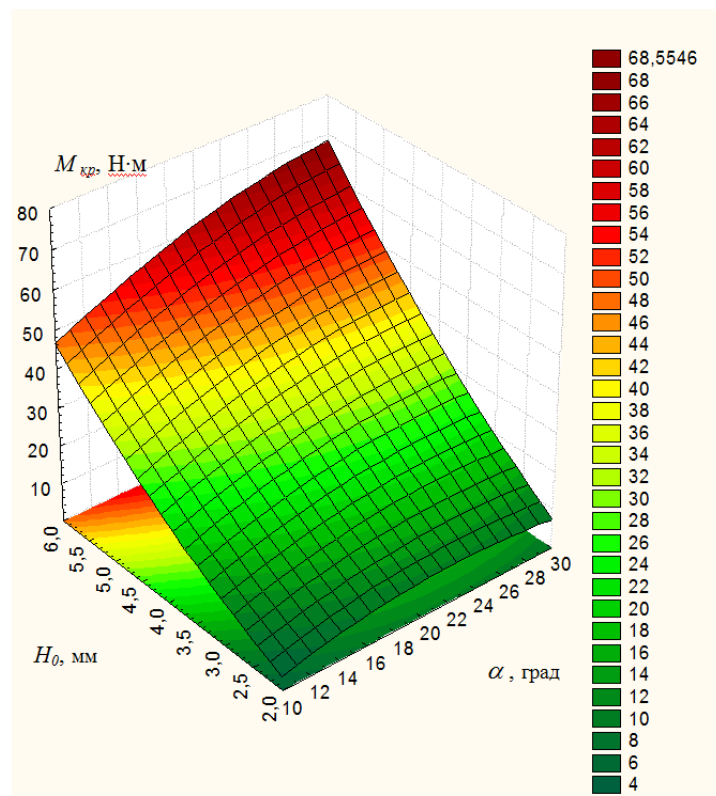
Рис. 4.10. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності крутного моменту  $M_{кр(B_0, \alpha)}$  для процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок ( $H_0=4\text{мм}$ )



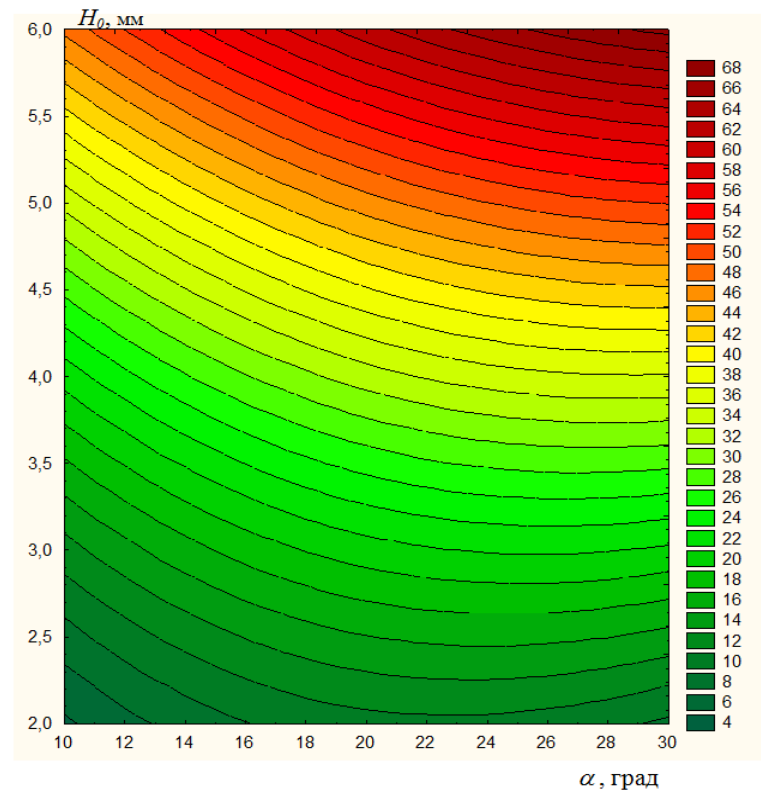


б)

Рис. 4.12. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності крутного моменту  $M_{(B_0, H_0)}$  для процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок ( $\alpha = 20$  град)



а)



б)

Рис. 4.13. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності крутного моменту  $M_{кр(\alpha, H_0)}$  для процесу калібрування витка гвинтової заготовки на крок ( $B_0=35$  мм)

З рис. 4.10 - 4.13 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  $\alpha$  і товщини витка  $H_0$ , для матеріалу сталь 08кп робочого органа крутний момент зростає і досягає 79 Н м. Із аналізу графічних залежностей встановлено, що домінуючим фактором, який впливає на значення  $M_{кр}$ , є кут нахилу клина пристрою  $\alpha$ , а найменш впливовим є  $B_0$ . 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).

#### 4.6. Результати порівняння теоретичних і експериментальних досліджень величини крутного моменту на приводі при калібруванні витків на крок

В результаті проведення експериментальних досліджень величини крутного моменту на приводі при калібруванні витків на крок були отримані дані для побудови графічних залежностей. Для порівняння отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень побудовані графічні залежності крутного моменту (рис. 4.14 і рис. 4.15).

На рис. 4.14 представлені графічні залежності зміни крутного моменту від ширини стрічки  $B_0$  та товщини витка стрічки  $H_0$  (сталь 08кп,  $\alpha = 20^\circ$ ), а на рис. 4.16 - від ширини стрічки  $B_0$  та кута нахилу клина пристрою  $\alpha$  (сталь 08кп,  $H_0 = 4$  мм).

Отже, в результаті порівняння теоретичних та експериментальних результатів досліджень крутного моменту в процесі калібрування ГСЗ на крок відхилення становить в межах 7% - 13%.

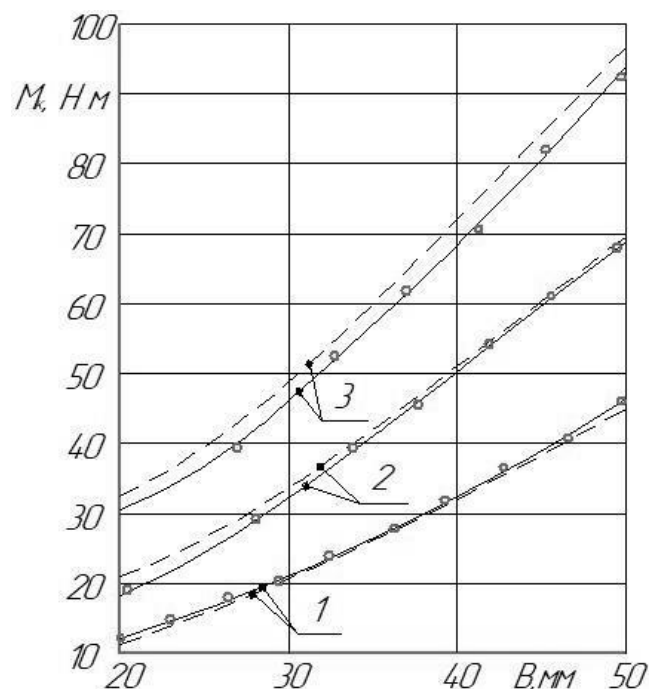


Рисунок 4.14. Графічні залежності порівняння теоретичних — — — та експериментальних ————— результатів досліджень крутного моменту на оправі від ширини полицки  $B_0$  та товщини витка спіралі  $H_0$  (сталь 08кп,  $\alpha = 20^\circ$ ): 1)  $H_0 = 2$  мм; 2)  $H_0 = 4$  мм; 3)  $H_0 = 6$  мм



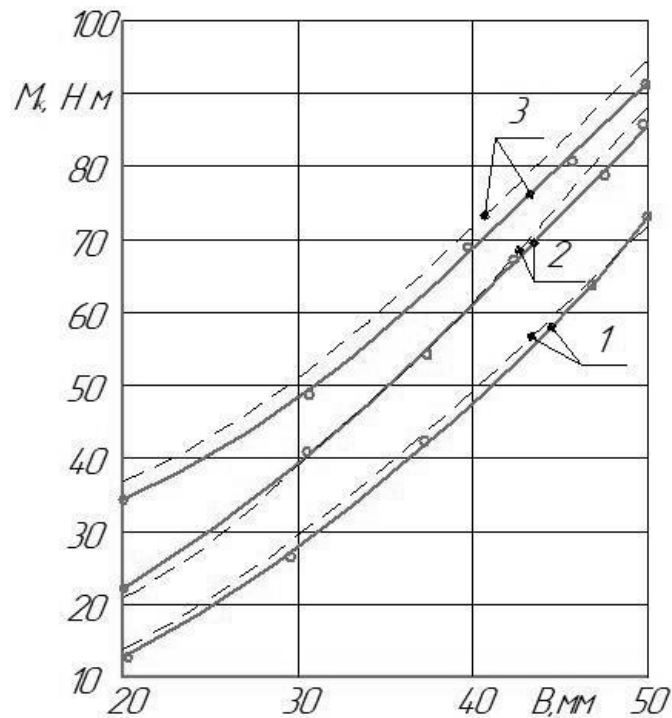


Рисунок 4.15. Графічна залежність порівняння теоретичних — — — та експериментальних ————— результатів досліджень крутного моменту на оправці від ширини полицки  $B_0$  та кута нахилу клина  $\alpha$  (сталь 08кп,  $H_0 = 4$  мм): 1)  $\alpha = 10^\circ$ ; 2)  $\alpha = 20^\circ$ ; 3)  $\alpha = 30^\circ$

#### 4.7. Результати експериментальних досліджень величини тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин

На основі повнофакторного експерименту та розробленої методики проведення досліджень, що представлено в розділі 3 визначали закономірності зміни величини тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин.

Величину тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп визначено за допомогою пристроїв і способів, описаних в розділі 3. Для кожної комбінації факторів проводили трьохкратне повторювання експерименту, після чого визначали середнє значення тангенціальної сили різання, яке використовували для оброблення результатів експерименту із використанням методів статистичного аналізу.

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  $V$ , тобто  $P_z=f(t, S, V)$ .

Функцію відгуку, тобто величину тангенціальної сили різання  $P_z=f(t, S, V)$ , одержану на основі даних експериментальних досліджень, представлено у вигляді полінома другої степені, використовуючи стандартні алгоритми та програмне забезпечення. Результати кодування факторів та вибору рівнів їх варіювання представлено у табл. 4.7.

Формування табл. 4.7. проведено на основі попередніх даних проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів машин. Основними факторами експерименту ПФЕ 3<sup>3</sup> прийнято технологічні величини:

- глибини різання  $t$  прохідним різцем, яку кодували індексом  $x_1$ ;
- подача  $S$  прохідного різця, яку кодували індексом  $x_2$ ;
- швидкість різання  $V$ , яку кодували індексом  $x_3$ .

Таблиця 4.7

Результати вибору рівнів варіювання та кодування факторів при встановленні величини тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп

Кодоване позначення фактора	Найменування фактора	Значення рівнів фактора
$x_1$	Глибина різання $t$ прохідним різцем, мм	0,5 – 0,75- 1
$x_2$	Подача $S$ прохідного різця, мм/об	0,1 – 0,2 - 0,3
$x_3$	Швидкість різання $V$ , м/хв	100 – 140 - 180

Значення коефіцієнтів рівняння регресії, що визначенні на основі статистичного аналізу даних вимірювань тангенціальної сили різання під час проточування поверхні заготовок гвинтових секційних робочих органів представлено у табл. 4.8.

Значення коефіцієнтів рівняння регресії

Коеф.	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
Сталь 08кп	277,2	68,	65,3	-27,9	16,63	-6,88	-	-2,89	-9,39	5,61
	4	8					6,63			

Загальний вигляд рівняння тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп залежно від зміни: глибини різання  $t$  прохідним різцем, подачі  $S$  прохідного різця та швидкості різання  $V$ , тобто  $P_{z(x_1, x_2, x_3)} = f(t, S, V)$  за результатами проведених експериментів у кодованих значеннях дорівнює:

- під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп:

$$P_{z(x_1, x_2, x_3)} = 277,24 + 68,8x_1 + 65,3x_2 - 27,9x_3 + 16,63x_1x_2 - 6,88x_1x_3 - \quad (4.9)$$

$$- 6,63x_2x_3 - 2,89x_1^2 - 9,39x_2^2 + 5,61x_3^2,$$

де  $x_1$  - кодоване значення глибини різання прохідним різцем,  $x_2$  - кодоване значення подачі прохідного різця;  $x_3$  - кодоване значення швидкості різання.

Усі коефіцієнти рівняння регресії (4.9) є значущими.

Після перетворення та спрощення у натуральних величинах рівняння регресії (4.9) записано в кінцевому вигляді:

- під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп:

$$P_{z(t, S, V)} = 24,17 + 307,84t + 761,75S - 0,832V + 665,2tS - 0,688tV - \quad (4.10)$$

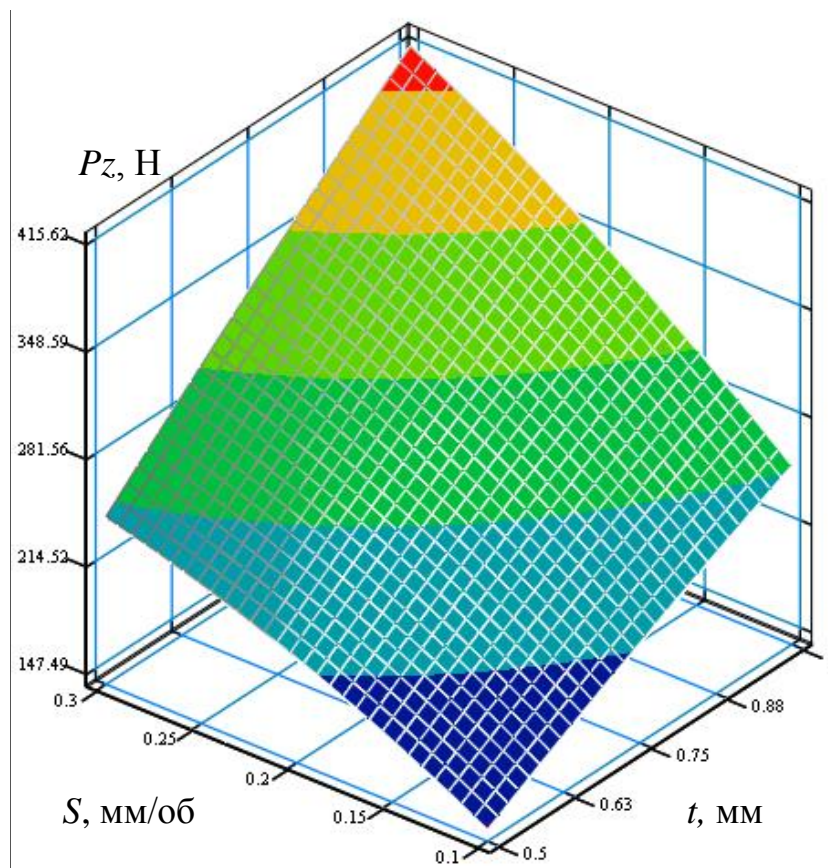
$$- 1,66SV - 46,24t^2 - 939S^2 + 0,0035V^2.$$

Виведені рівняння регресії (4.9) та (4.10) можна застосовувати для прогнозування величини тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування

заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп залежно від: глибини різання  $t$  прохідним різцем, подачі  $S$  прохідного різця та швидкості різання  $V$  у таких межах змінних початкових факторів:

$$0,5 \leq t \leq 1 \text{ (мм)}; 0,1 \leq S \leq 0,3 \text{ (мм/об)}; 100 \leq V \leq 180 \text{ (м/хв)}.$$

Графічні значення результатів залежності тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп, одержаних із застосуванням стандартного програмного забезпечення, представлено на рис. 4.16, 4.17, 4.18.



a)

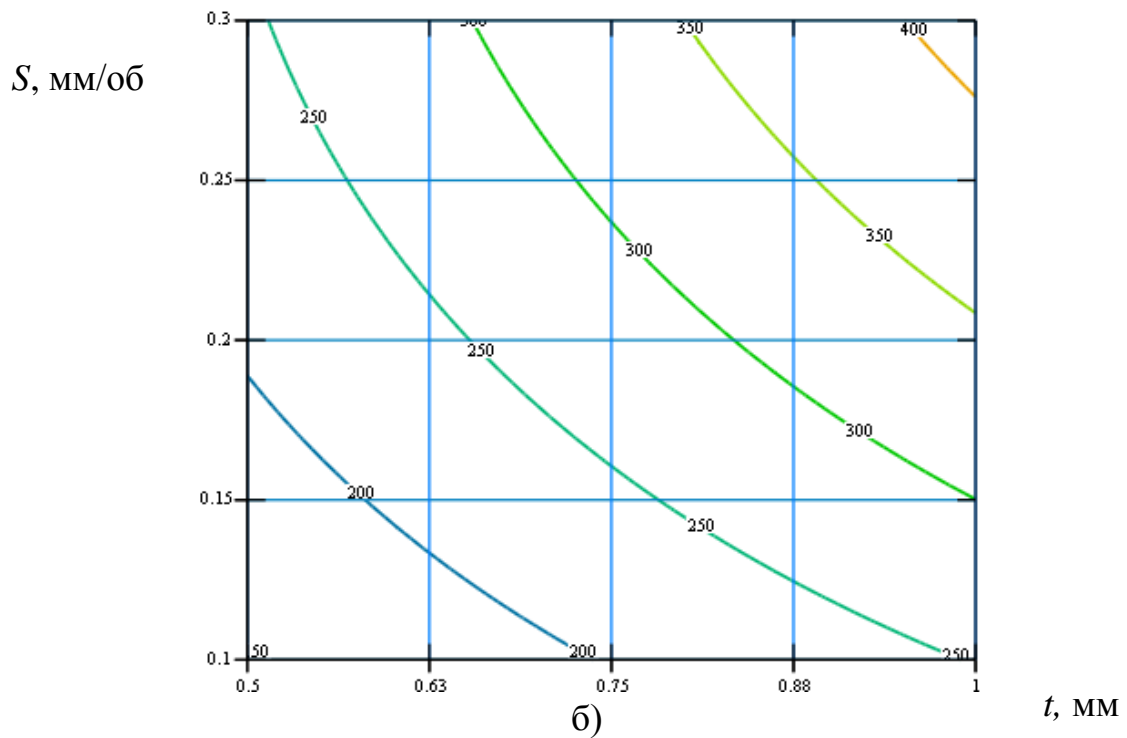
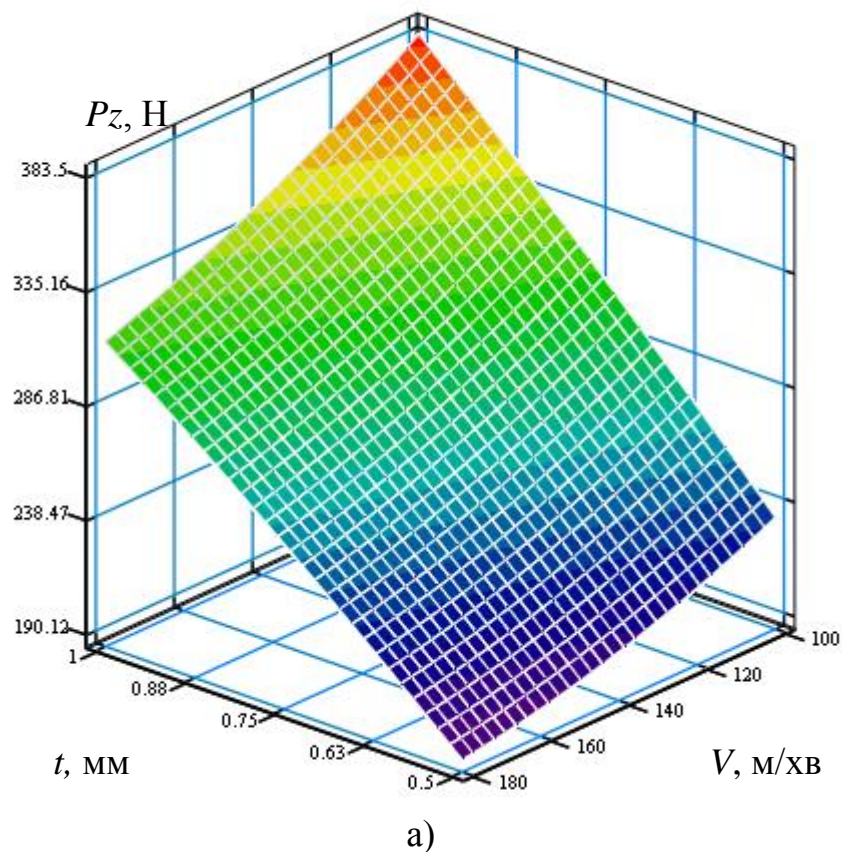
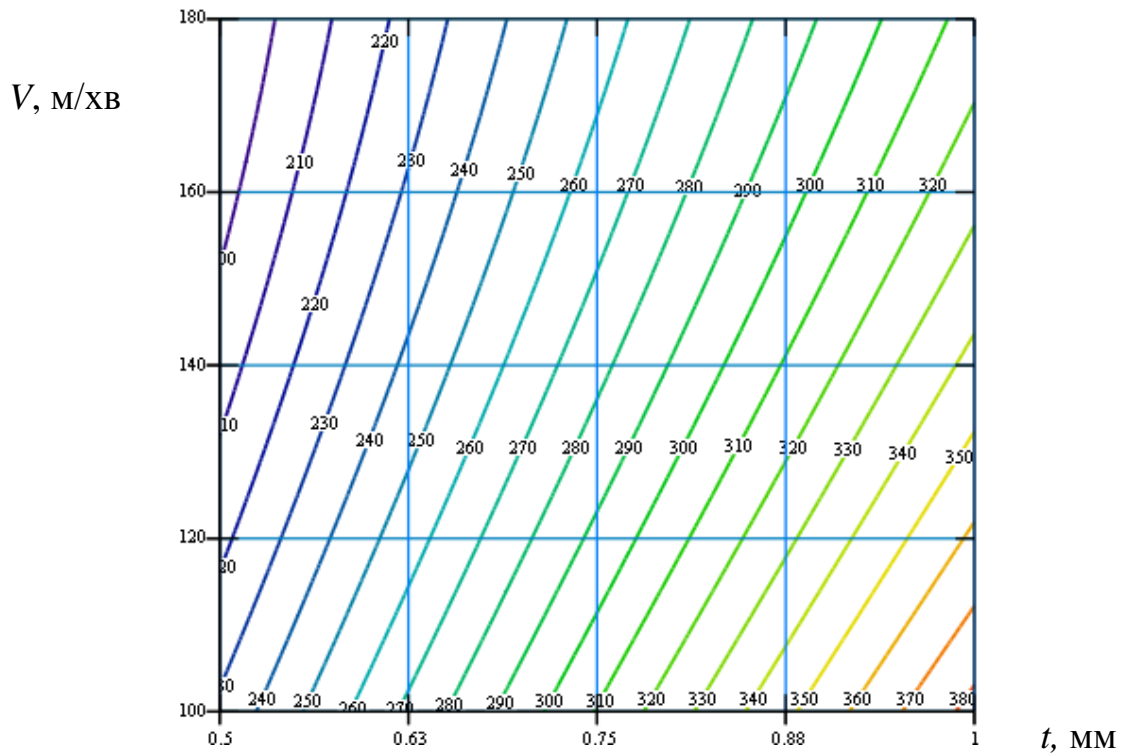


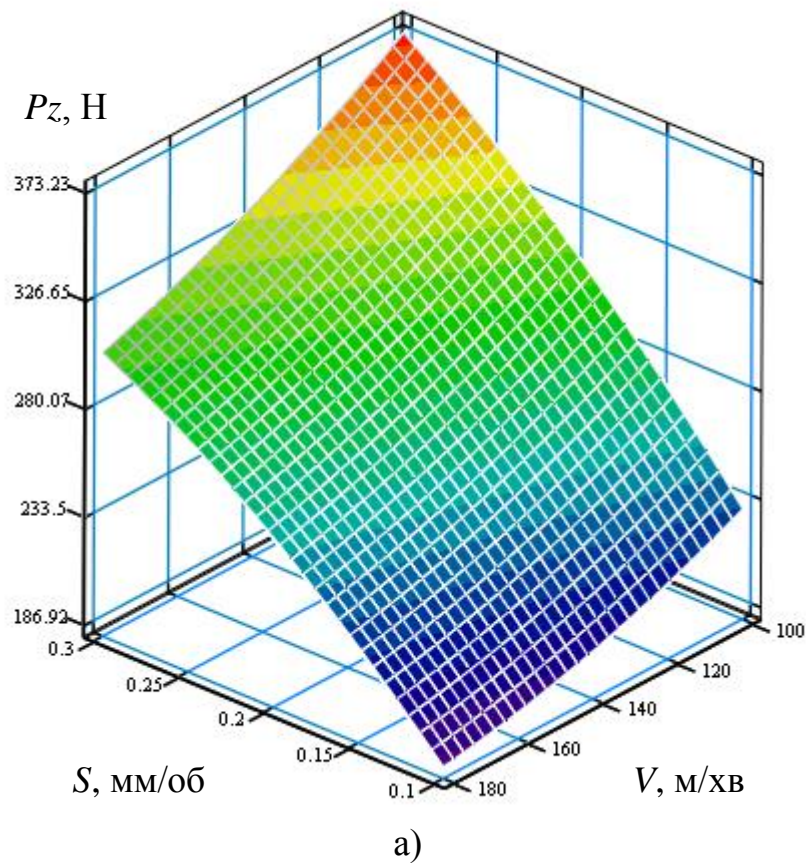
Рис. 4.16. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп від глибини різання  $t$  прохідним різцем та подачі  $S$  прохідного різця ( $V=140\text{м/хв}$ )





б)

Рис. 4.17. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп від глибини різання  $t$  прохідним різцем та швидкості різання  $V$  ( $S=0,2$ мм/об)



а)

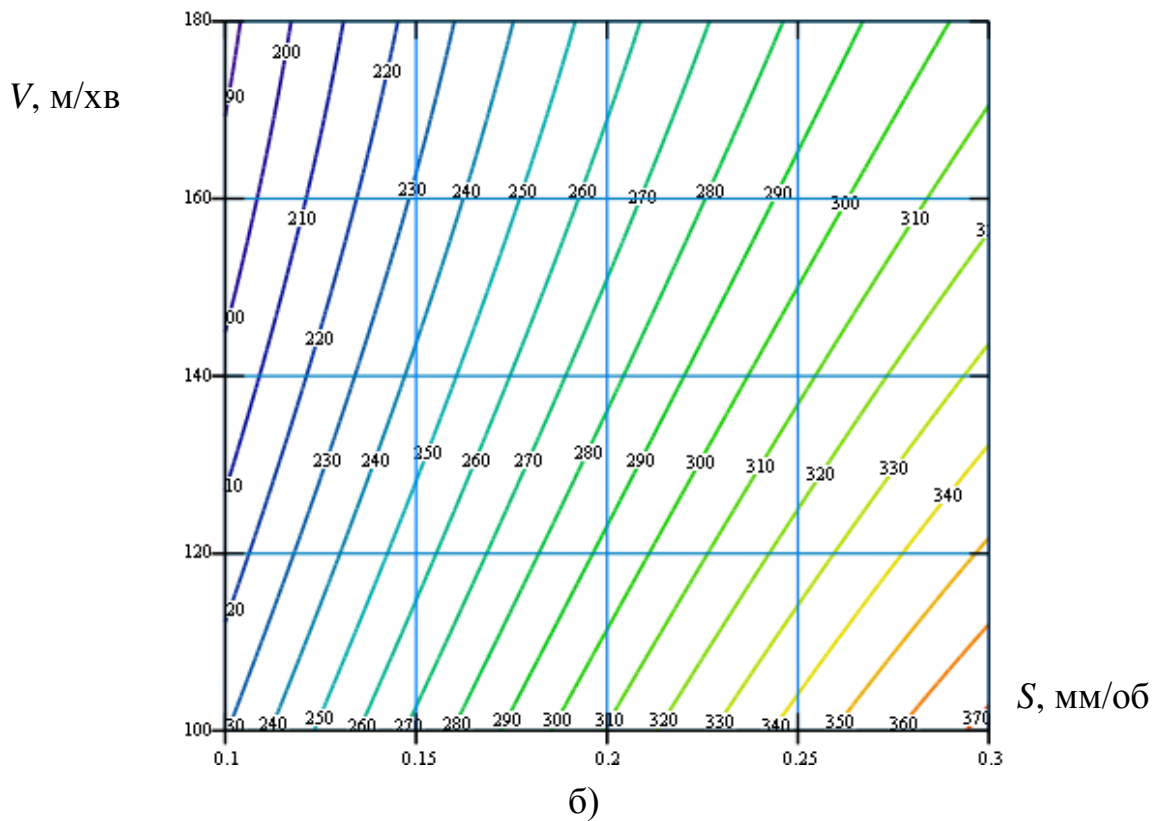


Рис. 4.18. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності тангенціальної сили різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп від подачі  $S$  прохідного різця та швидкості різання  $V$  ( $t=0,75\text{мм}$ )

З рисунків 4.16, 4.17, 4.18 та на основі аналізу рівняння регресії (4.10) встановлено, що із збільшенням глибини різання  $t$  прохідним різцем та подачі  $S$  прохідного різця тангенціальна сила різання  $P_z$  під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп збільшується, при цьому збільшення швидкості різання призводить до зменшення тангенціальної сили різання  $P_z$ .

Також встановлено, що проточування стиснутих витків заготовок гвинтових секційних робочих органів забезпечує вищу стійкість різців, менші ударні навантаження, вищу якість поверхні порівняно із проточуванням розтягнутих витків на крок.

#### 4.8. Висновки

1. В результаті проведення повнофакторного експерименту типу ПФЕ  $3^3$  знайшли експериментальне підтвердження теоретичні викладки, які відносяться до встановлення закономірностей зміни крутного моменту в процесі калібрування ГСЗ на крок зі сталі 08кп від зміни кута нахилу клина пристрою  $\alpha$  (в межах  $10^\circ$ - $30^\circ$ ), ширини стрічки  $B_0$  (в межах 20 - 50 мм). Встановлено, що переважаючими факторами, які впливають на величину крутного моменту при калібруванні витків на крок, є кут нахилу клина пристрою  $\alpha$ , а найменш впливовим є  $B_0$ . Встановлено, що зміни крутного моменту від кута нахилу клина пристрою  $\alpha$  та товщини витка спіралі  $H$  знаходяться в межах для сталі 08кп від 5,2 до 76 Н·м. Розбіжність між результатами теоретичних і експериментальних досліджень становить 7% - 13%.

2. Отримано регресійні залежності для визначення крутного моменту калібруванні витків на крок ГСЗ в межах параметрів:  $20 \leq B_0 \leq 50$  (мм);  $10 \leq \alpha \leq 30$  (град);  $2 \leq H_0 \leq 6$  (мм), виготовлених з різних матеріалів (сталь 08 кп, Ст 3). Для визначення регресійних залежностей використано пакет статистичної програми для ПК, за допомогою якого побудовано графічні відтворення проміжних загальних регресійних моделей у вигляді квадратичних поліномів.

3. Аналіз результатів експериментальних досліджень утворення сферичної втулки для гвинтового секційного робочого органа із сталі 08кп свідчить, що із збільшенням товщини заготовки, а також радіуса сфери зусилля зростає, а при збільшенні діаметра заготовки – спадає. Максимальне значення зусилля складає 6,28 кН для заготовок із сталі 08кп.

4. Проведено комплекс експериментальних досліджень процесів навивання гвинтових заготовок пристроєм з обертовою втулкою із зовнішніми радіусами оправи  $R=40$ - $60$  мм з профілів шириною до 30мм і товщиною  $H_0=1$ - $3$  мм для: сталей 0,8 кп, Ст 3. Із графічних залежностей встановлено, що для сталі



08кп при  $H_0=2\text{мм}$ ,  $R=50\text{мм}$  і зміні  $B_0$  у межах 10-30мм згинальний момент навивання набуває значень 399-511Н·м; а для сталі Ст 3 згинальний момент навивання зростає в 1,07 рази та знаходиться в межах від 431Н до 548Н·м.

5. Встановлено, що максимальне значення тангенціальної сили різання під час проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів із сталі 08кп становить 464 Н, а мінімальне – 137 Н. Збільшення глибини різання  $t$  прохідним різцем від 0,5 мм до 1 мм призводить до зростання тангенціальної сили різання в 1,68 рази. Збільшення подачі  $S$  прохідного різця від 0,1 мм/об до 0,3 мм/об створює передумови для збільшення тангенціальної сили різання в 1,63 рази, а збільшення швидкості різання  $V$  від 100 до 180 м/хв призводить до зменшення тангенціальної сили різання в 1,23 рази. Тому проточування заготовок гвинтових секційних робочих органів доцільно проводити при підвищених частотах обертання шпинделя із зменшенням подачі прохідного різця.

## РОЗДІЛ 5

### ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ГВИНТОВИХ СЕКЦІЙНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

#### 5.1. Комп'ютерне моделювання для вибору раціональних конструктивних параметрів гвинтового секційного робочого органу

Для створення моделі та розрахунків гвинтового секційного робочого органу (рис. 5.1) використовували пакет прикладних програм [39].

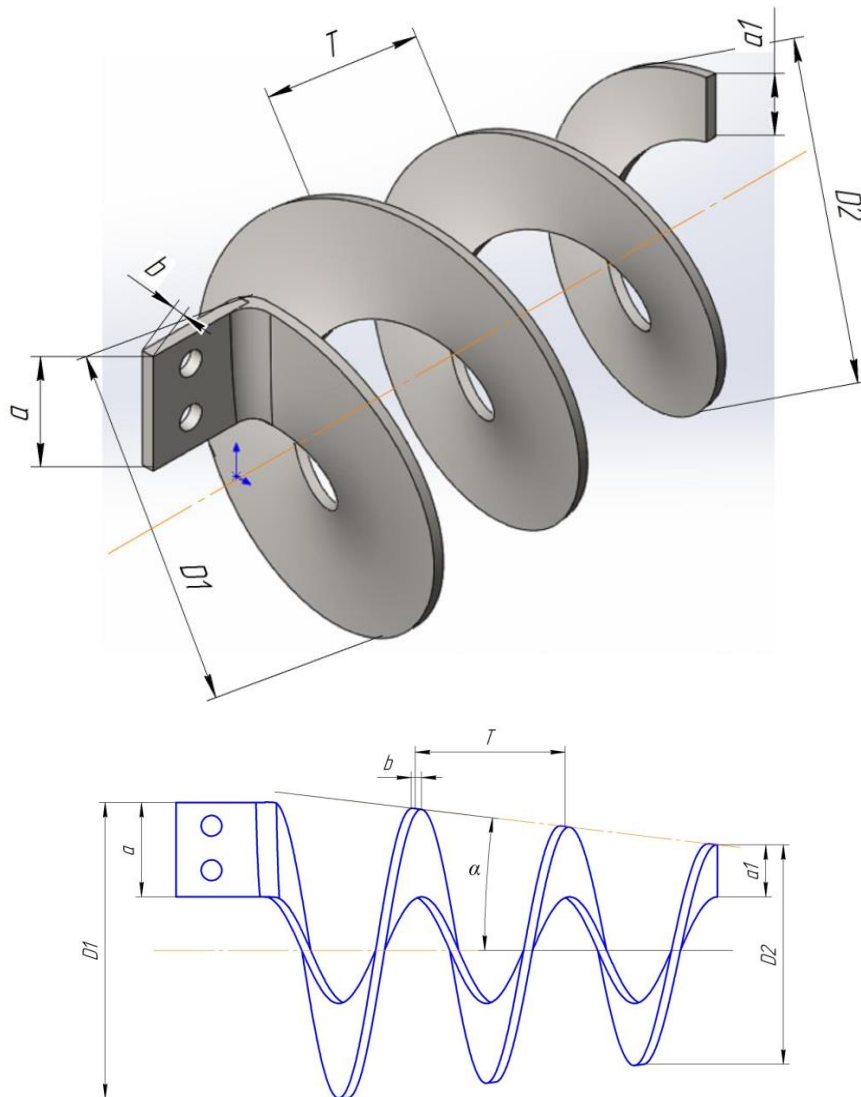


Рис. 5.1. Комп'ютерна модель та конструктивна схема розрахунку кута закручування гвинтової спіралі  $\varphi$

Проведено моделювання кута закручування секції  $\phi$  та одержано графічні залежності крутного моменту у відповідності до експериментальних досліджень. Гвинтову стрічку секційного робочого органу жорстко закріплювали з однієї сторони (на рис. 5.2 показано з лівої сторони), а до іншого сторони прикладали крутний момент (показано з правої сторони). Дослідження проводили за змінними параметрами, а саме товщина спіралі  $\delta$ ; зміни кута конуса  $\alpha$  з прикладенням крутного моменту  $T_k$ .

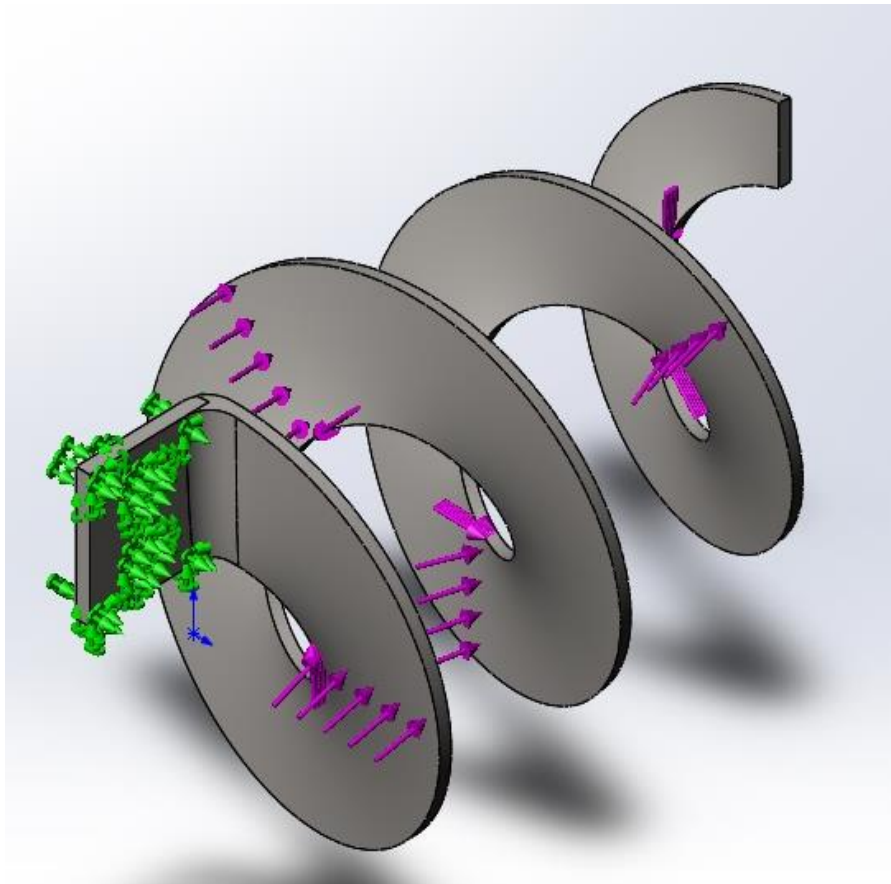


Рис. 5.2. Комп'ютерна модель гвинтової спіралі з прикладенням до неї навантаження

На основі моделювання отримано графічні фрагменти переміщення компонентів гвинтової спіралі робочого органу (рис. 5.3), напруження компонентів гвинтової спіралі робочого органу (рис. 5.4) та деформації компонентів гвинтової спіралі робочого органу (рис. 5.5) з прикладенням крутного моменту  $T_k$ .

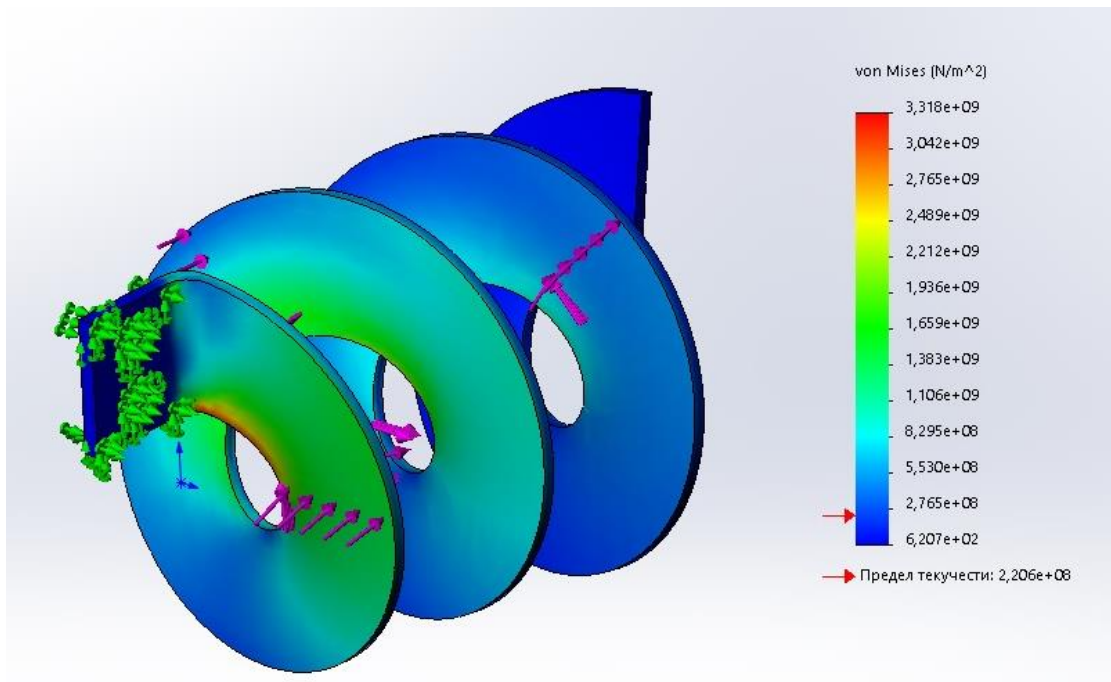


Рис. 5.3. Переміщення компонентів гвинтової спіралі робочого органу з прикладенням крутного моменту  $T_k$

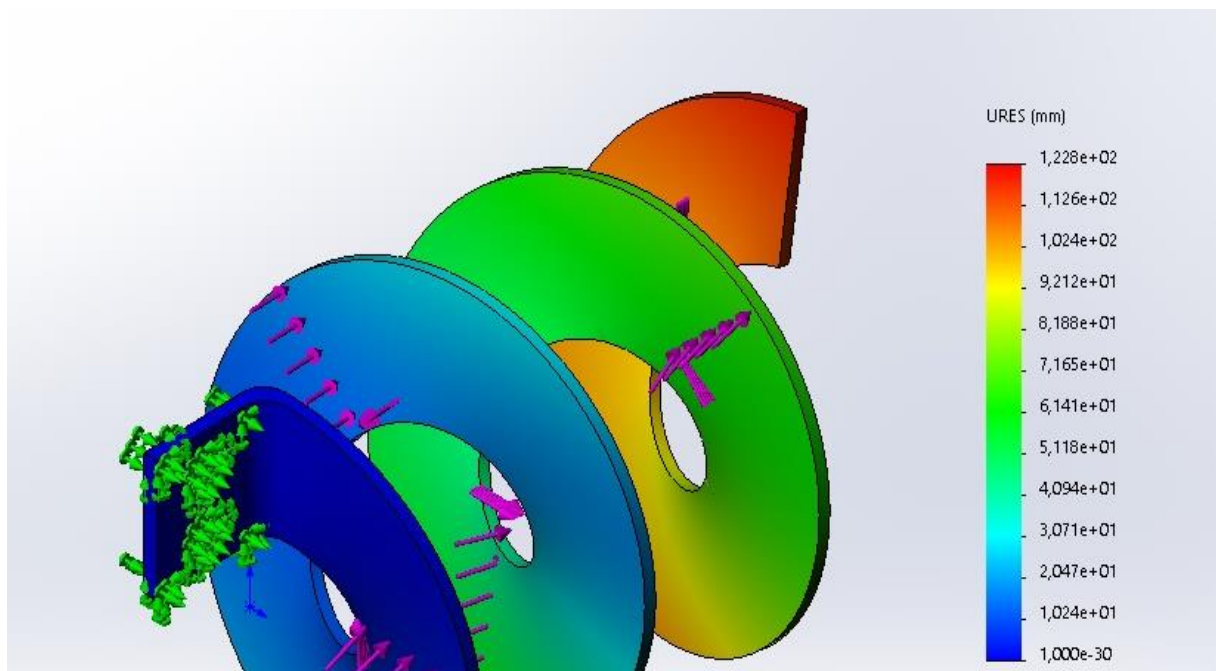


Рис. 5.4. Напруження компонентів гвинтової спіралі робочого органу з прикладенням крутного моменту  $T_k$

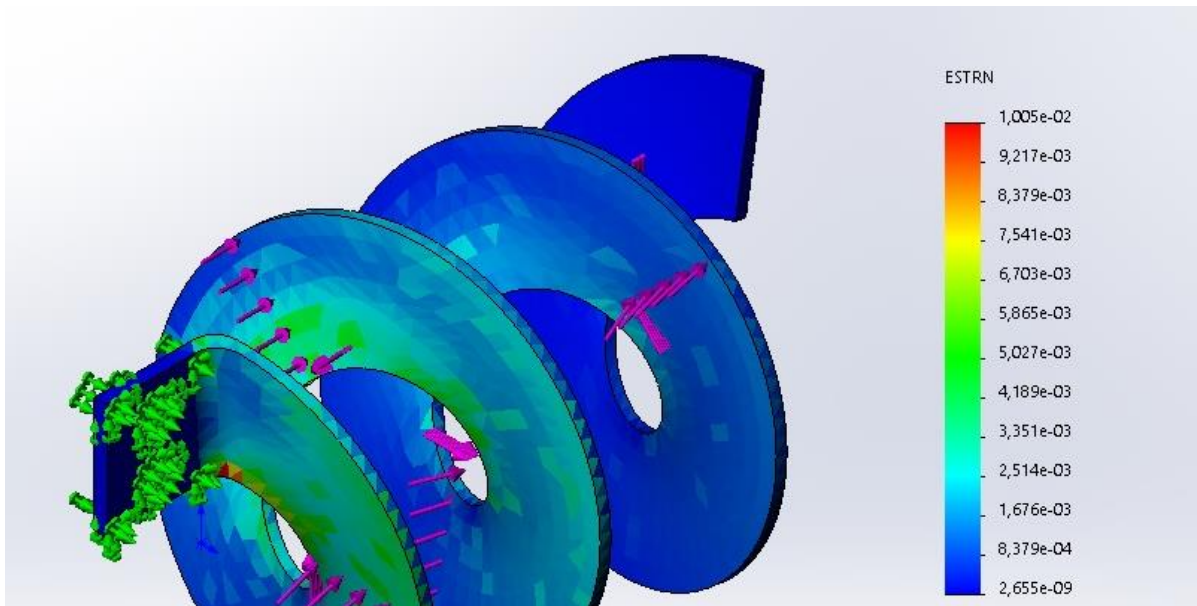


Рис. 5.5. Деформації компонентів гвинтової спіралі робочого органу з прикладенням крутного моменту  $T_k$

Згідно методики, яка описана у підрозділі 3.6. отримано значення кута закручування гвинтової спіралі  $\varphi$  при зміні кута конуса  $\alpha$ , товщини гвинтової спіралі секції  $b$  та відповідного крутного моменту  $T_k$ .

На основі цього одержані графічні залежності кута закручування гвинтової спіралі робочого органу  $\varphi$  від зміни кута конуса  $\alpha$  та кута закручування гвинтової спіралі робочого органу  $\varphi$  від зміни товщини гвинтової спіралі  $b$ , які наведені на рис. 5.6 і 5.7.

Проаналізувавши графічні залежності (рис. 5.6), показано, що кут закручування гвинтової спіралі робочого органу зростає при збільшенні крутного моменту. Встановлено, що максимальне зростання досягається для кута конуса  $\alpha = 5$ , а найменше для товщини стрічки –  $b = 4$ мм.

З рис. 5.7 видно, що кут конуса  $\alpha$  має не значимий вплив на кут закручування гвинтової спіралі робочого органу  $\varphi$  порівняно із товщиною спіралі  $b$ .

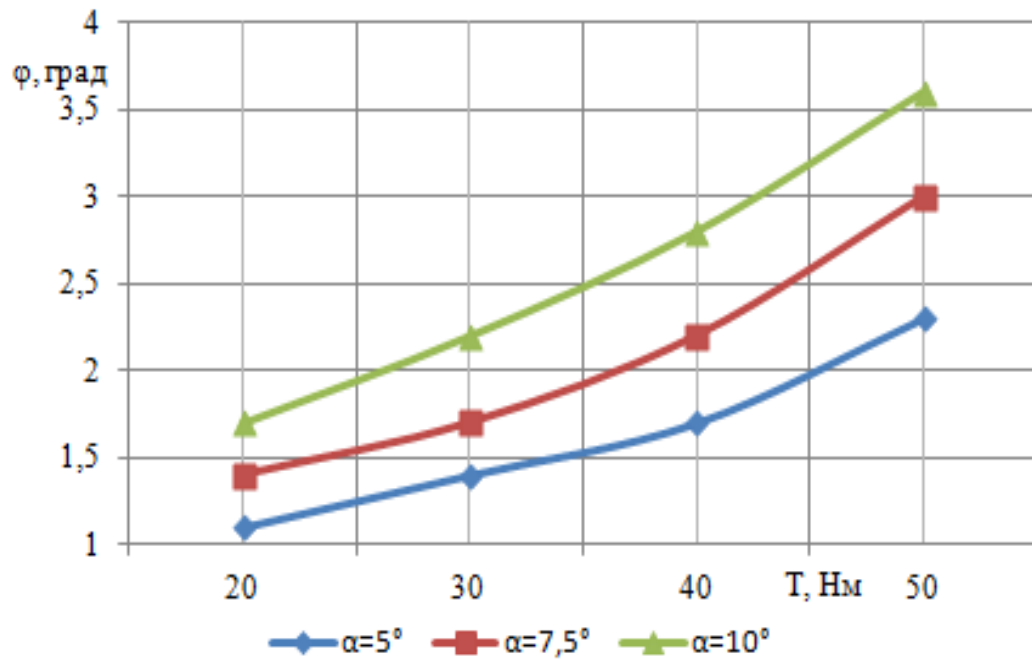


Рис. 5.6. Графічні залежності кута закручування гвинтової спіралі робочого органу  $\varphi$  від зміни кута конуса  $\alpha$

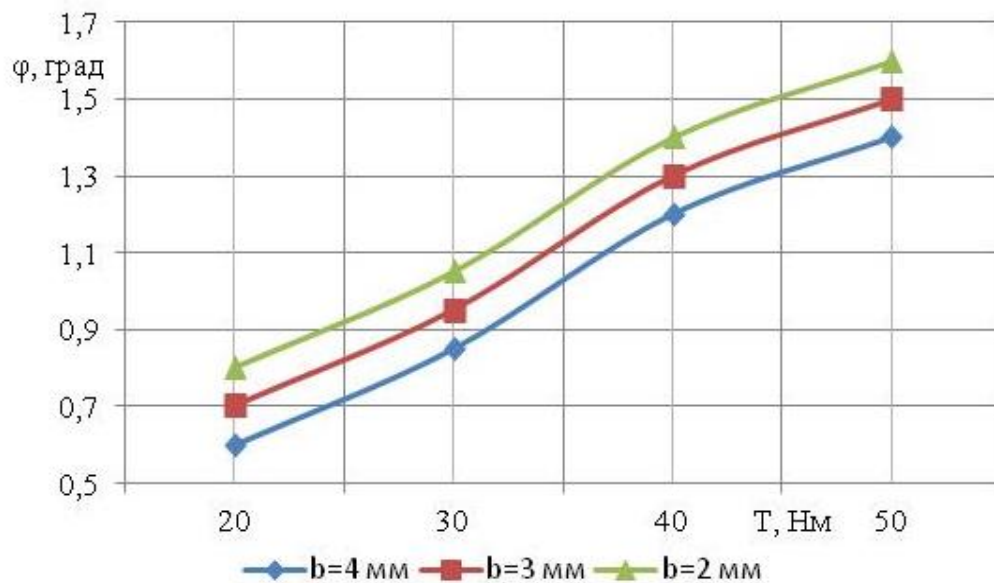


Рис. 5.7. Графічні залежності кута закручування гвинтової спіралі робочого органу  $\varphi$  від зміни товщини гвинтової спіралі  $b$ .

Одержані значення результатів в порівнянні з теоретичними та експериментальними дослідженнями та комп'ютерного моделювання встановлено, що подібність одержаних результатів подібності між розрахункових та експериментальних становить 8..14%.

## **5.2. Технологічність конструкцій гвинтових секційних робочих органів**

Поняття «технологічність конструкції» охоплює як технічну, так і економічну сторону виробництва, які ніколи не слід розділяти, оскільки вони взаємопов'язані. Проблема створення технологічних конструкцій машин має важливе народногосподарське значення. Правильне її рішення дозволяє: а) знизити трудомісткість і собівартість виготовлення машини; б) краще використовувати наявні основні засоби підприємств; в) знизити витрати на підготовку виробництва; г) зменшити терміни вивчення машини. Технологічною вважають конструкцію, яка може бути швидко і з мінімальними витратами вивчена у виробництві та виготовляється найбільш раціональними способами в заданих кількостях і умовах виробництва. Технологічність конструкції машини визначається сукупністю кінематичних, конструктивних і технологічних рішень, здійснюваних у процесі проектування машини на основі порівняльного техніко-економічного аналізу [28].

Встановлені факторами, які впливають на проектування гвинтових механізмів:

- технологічний процес та матеріал, для виготовлення гвинтових механізмів;
- простота та мінімізація в конструкції;
- низька собівартість виготовлення та економічні показники при експлуатації;
- висока якість, термін служби, надійності в експлуатації;
- вимоги до безпеки експлуатації.

Основні вимоги до гвинтових робочих органів (ГРО) є:

- не має функціонального призначення;
- пружність і міцність на кручення та згинання;
- довговічність та припрацювання.

Гвинтові спіралі виготовляють з легованих та конструкційних сталей, у вигляді суцільних або ГСРО. За технологічним призначенням робочі поверхні гвинтових спіралей підтягаються хромуванню, нанесенню інших покриттів.

Конструктивні параметри ГРО залежать від технології виготовлення, а також вимогам які ставляться перед робочими органами, а саме: функціональне призначення; пружність і міцність на кручення та згинання та довговічність. З огляду на аналіз конструкцій ГСРО і їх технології виготовлення встановлено розрив із заниженням можливості матеріалів щодо деформацій, коефіцієнта використання матеріалу, якості обробки та інше. На основі цих тверджень до вимог технологічного формування конструктивних параметрів гвинтових заготовок в таблиці 5.1 наведено показник технологічності та конструктивної складності виготовлення ГСРО [28, 31, 39].

Таблиця 5.1

Показник технологічності та конструктивної складності виконання гвинтових заготовок

№ з/п	Показники технологічності	Аналітичний зміст показника	Зміст складових параметрів
1	2	3	4
1.	Коефіцієнт використання матеріалу	$K = \frac{M_d}{M_z}$	$M_d$ – маса деталі; $M_z$ – маса заготовки
2.	Коефіцієнт нерівномірності витягування стрічки за зовнішнім і внутрішнім краями спіралі	$\psi = \frac{(r_0 + B)}{r_0}$	$r_0$ – радіус спіралі за внутрішнім краєм; $B$ – ширина стрічки
3.	Коефіцієнт кроку спіралі	$K_T = T/(r_0 + B)$	$T$ – крок спіралі
4.	Питома висота витка	$b' = B/H$	$H$ – товщина спіралі
5.	Відносний радіус згину спіралі	$r' = r_0/B$	
6.	Радіус нейтрального шару деформації витка	$\rho_0 = \sqrt{r_0^2 + Br_0}$	
7.	Відносна товщина спіралі	$\delta_k = 1/b'$	
8.	Відносне видовження спіралі	$\delta_{звп} = 0,5(\sqrt{\psi} - 1)$	
9.	Стійкість стрічки процесі формоутворення ГЗ; - коефіцієнт стійкості стрічки у процесі згину; - величина критичного зусилля згину стрічки; - коэф. стійкості вальцювання; - коефіцієнт стійкості для операції розгину спіралі на крок	$K_{y_{\text{зв}}} = \delta_k^3 (\psi - 1)$ $P_{\text{кр}}$ $K_c = \frac{T \delta_k}{D \psi}$ $K_{\text{звп}} = \frac{\delta B^2}{[T^2 (\psi - 1)]}$	$D$ – зовнішній діаметр спіралі
10.	Коефіцієнт технологічної складності виготовлення НЗ	$K_{\text{мс}} = (\psi - 1)^2 K_z$	$x$ – показник степеня функції; $K_z$ – коефіцієнт
11.	Зведена висота навивних заготовок	$b_{\text{зв}} = (\psi - 1)^2 K_z b'$	



В процесі аналізу конструкцій ГСРО на технологічність проводять відпрацювання на технологічність гвинтової стрічки.

При виготовленні ГСРО з гвинтової стрічки, потрібно вибирати один основний спосіб її виготовлення за даними конструктивними параметрами, які наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Основні конструктивні параметри гвинтових деталей для виготовлення різним способом

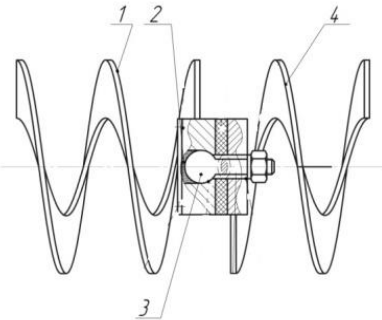
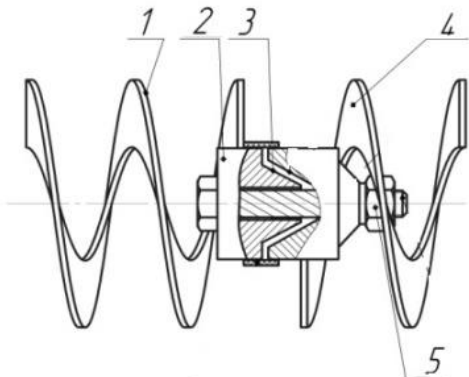
№ п/п	Спосіб формоутворення	Коефіцієнт використання матеріалу, К	Питома висота витка, $b'$
1.	Штампування	0,4 - 0,5	Необмежена
2.	Прокатування з прямокутних заготовок	0,55 - 0,98	$\leq 3$
3.	Прокатування з трапецієвидних заготовок	0,55 - 0,98	$\leq 3,5$
4.	Прокатування з круглого прокату	0,55 - 0,98	$\leq 1,5$
5.	Навивання ГД по внутрішньому торцю профілю з прямокутних заготовок	0,9 - 1,0	2 - 16
6.	Навивання спіралей по внутрішньому торцю профілю з трапецієвидних заготовок	0,9 - 1,0	2 - 21
7.	Навивання по внутрішньому торцю профілю з круглого прокату	0,9 - 1,0	0,8 - 3
8.	Навивання спіралей із заготовок з вирізом по внутрішньому діаметрі	0,85 - 0,95	15 - 30
9.	Навивання спіралей по зовнішньому торцю профілю з прямокутних заготовок	0,9 - 1,0	2 - 19
10.	Навивання по зовнішньому торцю профілю з круглого прокату	0,9 - 1,0	0,8 - 3,4
11.	Навивання спіралей із заготовок по зовнішньому діаметрі	0,5 - 0,9	15 - 30

Визначальним питанням технологічності конструкції та собівартості виготовлення гвинтової заготовки з врахуванням їх технічних умов для ГСРО є зменшення кількості складових частин в даних конструкціях. При проектуванні ГСРО необхідно використовувати значну кількість стандартних деталей, що забезпечить виготовлення ГСРО високої якості, експлуатаційної надійності та довговічності, а також забезпечується низька трудомісткість виготовлення та технологічна собівартість.

На основі аналізу технологічності конструкції та собівартості виготовлення гвинтової заготовки було створено прогресивні конструкції гвинтових робочих органів (табл. 5.3), що дають можливість отримати найбільш раціональні конструктивні рішення для економії витрат, зусиль та часу.

Таблиця 5.3.

## Конструктивні варіанти працездатних конструкції ГСРО

№ з/п	Конструктивне виконання секційних гнучких гвинтових робочих органів конвеєрів	
Патент № 81482	Гнучка гвинтова спіраль з фрикційним з'єднанням  $T = \frac{\pi}{2} zfpbD_{cp}^2$	
Патент №81482	Гнучка гвинтова спіраль з еліпсним з'єднанням секцій  $T = fN \frac{D_{cp}}{2}$	

## Продовження таблиці 5.3

<p>Патент №124004</p>	<p>Секційна спіраль з двохшарнірним з'єднанням</p> $T = 2RnN \cos \alpha_K$	
<p>Патент №124004</p>	<p>Секційна гвинтова спіраль з кульковим з'єднанням</p> $T = RnN \cos \alpha_K - \frac{T_{32}}{\cos \lambda}$	
<p>Патент №85011</p>	<p>Гнучка гвинтова спіраль з шарнірним з'єднанням секцій</p> $T = \frac{C \cdot \cos \alpha' \cdot [\Delta'_o -  R_o \cos \varphi' (\sec \alpha' - 1) ]}{\operatorname{tg} \left[ \arcsin \left( \frac{r_k - h_n}{r_k} \right) \right]} \times$ $\times [R_o (1 + \cos \varphi' (\sec \alpha' - 1)) + r_k - h_n]$	
	<p>Гвинтова секційна спіраль з гнучким валом</p> $T = \frac{\varphi E \pi r^4 t_c}{4 \pi \delta_{nom} \cdot L_c \left( 1 - \frac{\varphi}{360} \right)}$	

закінчення таблиці 5.3

Патент №123628	Гнучка гвинтова спіраль $T = \frac{T_1 \left( 2\pi + 4 \left( \mu_2 + \mu_3 \left( 1 + \frac{r}{R} \right) \operatorname{tg} \gamma \right) \operatorname{tg} \alpha \right)}{2\pi}$	
Патент №126986	Секція гнучкого гвинтового конвеєра $T = \frac{\frac{T_1 \sin \alpha + P_0 R \cos \alpha}{GHB^3 \xi} (256\pi^8 R^6 - 64\pi^6 R^4 T^2 + 64\pi^5 R^4 T^2 + 4T^4 R^2 \pi^2 - T^6) + \frac{12(T_1 \cos \alpha - P_0 R \sin \alpha)}{EHB^3} (-256\pi^7 TR^5 - 128\pi^5 T^3 R^3 - 16\pi^3 T^5 R)}{4\pi^3 (32\pi^5 R^4 + 24\pi^3 R^2 T^2 - 4R^2 \pi^2 T^2 + T^4)}$	

### 5.3. Інженерна методика розрахунок елементів установки для виготовлення гвинтових секційних робочих органів.

#### 5.3.1. Розрахунок навантаження на ролик

У даній оправці найбільші навантаження сприймають ролики, відповідно їх необхідно перевірити за напруженням зминання в залежності від типу контакту. Напруження зминання при лінійному контакті [1]

$$\sigma = 0,107 k_{\tau} \sqrt[3]{\frac{k_n R_p}{bD}} \leq [\sigma_n], \quad (5.1)$$

де  $k_{\tau}$  – коефіцієнт, який враховує дотичне навантаження в місці контакту;

$k_n$  – коефіцієнт нерівномірності по лінії контакту;

$R_p$  – сила реакції протидії ролику;

$b$  – ширина контакту ролика і дроту;

$D$  – діаметр ролика.

$$b = d - 2r_p, \quad (5.2)$$

де  $d$  – діаметр дроту;

$r_p$  – радіус заокруглення бортиків ролика.

Допустиме напруження змінанню  $[\sigma_n]$  при приведеному значенні кількості обертів за термін експлуатації

$$[\sigma_n] = [\sigma_0] \sqrt[9]{\frac{10000}{N}}, \quad (5.3)$$

де  $[\sigma_0]$  – допустиме напруження;

$N$  – кількість обертів.

Розрахункове значення кількості обертів за термін експлуатації

$$N = 3600 \frac{0,8vT}{\pi D}, \quad (5.4)$$

де  $v$  – швидкість обертання ролика;

$T$  – термін експлуатації ролика.

Також значне навантаження, у вигляді згинного моменту, сприймає вісь ролика. Умова міцності у небезпечному перерізі [1]

$$\sigma = \frac{M_{32}}{W} \leq [\sigma_0], \quad (5.5)$$

де  $M_{32}$  – значення згинного моменту;

$W$  – момент протидії згину у круглому січенні;

$$M_{32} = R_p \frac{D}{2}. \quad (5.6)$$

$$W = 0,1d_o^3, \quad (5.7)$$

де  $d_o$  – діаметр осі ролика.

Значення діаметра осі ролика, яке б витримувало зусилля навивання можна визначити з умови міцності

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{M_{32}}{0,1[\sigma]}}. \quad (5.8)$$

Тиск на ролик можна визначити виходячи з умови пластичного згину дроту

$$P = \frac{\sigma_T M_S}{c}, \quad (5.9)$$

де  $\sigma_T$  – межа текучості дроту, що навивається;

$M_S$  – пластичний момент опору перерізу дроту;

$c$  – відстань між осями ролика і оправки.

Для встановлення функціональної залежності сили тиску заготовки на ролик від відстані між осями ролика і оправки, було прораховано аналітичну залежність (5.9). Теоретичне значення пластичного моменту опору перерізу дроту приймалось  $M_S = 2,45 \times 10^{-3} \text{ м}^3$ , що відповідає діаметру дроту  $d = 5 \text{ мм}$ . В якості матеріалу дроту, що навивається, розглядалися марки сталей: 65 з межею текучості  $\sigma_T = 765 \text{ МПа}$ ; 75 з межею текучості  $\sigma_T = 885 \text{ МПа}$ ; 80 з межею текучості  $\sigma_T = 932 \text{ МПа}$ ; 50ХГ з межею текучості  $\sigma_T = 1175 \text{ МПа}$  та 60С2ХА з межею текучості  $\sigma_T = 1325 \text{ МПа}$ .

Шляхом аналізу числових даних, отриманих в результаті розрахунку залежності (5.9), а також аналізуючи отримані графічні залежності  $P = f(c)$  (рис. 5.8) теоретично встановлено, що в зазначеному діапазоні відстані між осями ролика і оправки спостерігається збільшення значення сили тиску на ролик при найменшому міжосьовому значенні. У діапазоні 0,15...0,25 значення сили тиску спадає. Причому це відбувається для всіх досліджуваних матеріалів.

Відповідно можна зробити висновок, що найбільш небезпечною є мінімальна відстань між осями ролика і оправки. Проте для підтвердження даного припущення необхідна серія експериментальних досліджень.

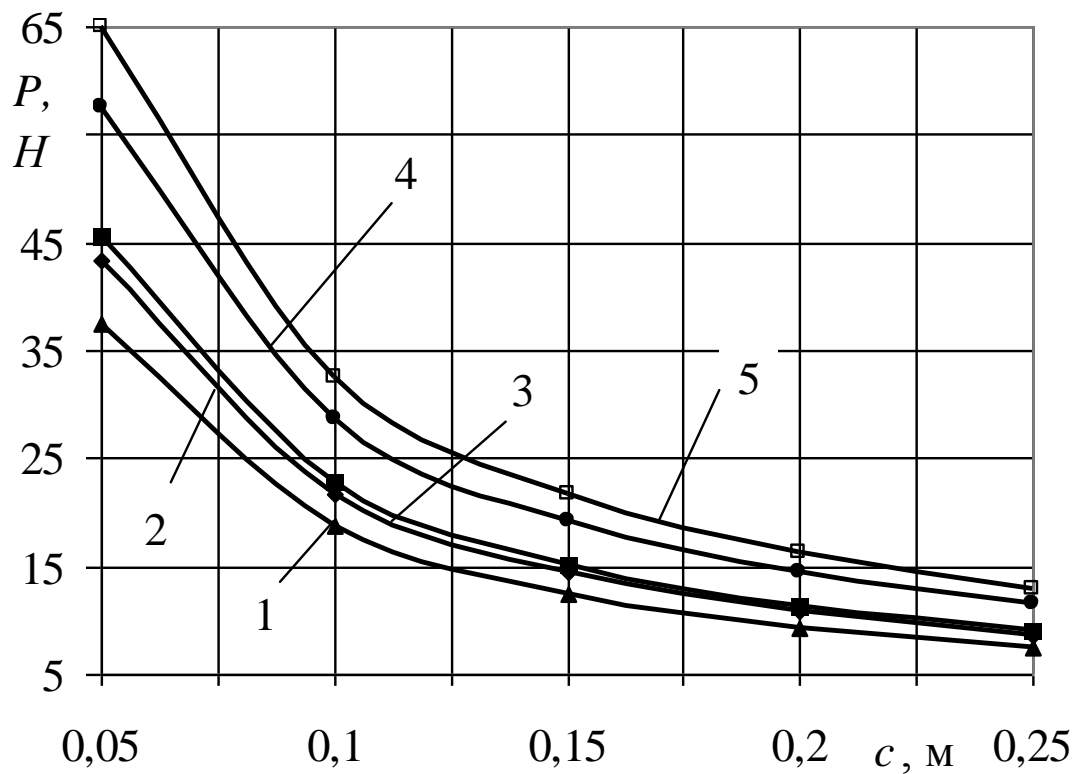


Рис. 5.8. Залежності сили тиску заготовки на ролик від відстані між осями ролика і оправки  $P = f(c)$  для різних матеріалів дроту:

- 1 –  $\sigma_{T65} = 765$  МПа; 2 –  $\sigma_{T75} = 885$  МПа; 3 –  $\sigma_{T80} = 932$  МПа;  
 4 –  $\sigma_{T50ХГ} = 1175$  МПа; 5 –  $\sigma_{T60С2ХА} = 71325$  МПа

Фактичні напруження, які виникають у ролику при дії статичних навантажень є незначними, відповідно вони не мають впливу на вибір діаметра ролика.

### 5.3.2. Розрахунок сил і напружень у ролику

Технологічний процес навивання супроводжується виникненням деформаційних напружень. Ролик також можна розглядати як товстостінний циліндр, який зазнає навантаження внутрішнім тиском від його осі, що створюється зусиллям подачі інструменту. Позначимо цей тиск через  $P_1$ . Дане зусилля та інші напруження показані на рис. 5.9.

З точки зору статки, для забезпечення умови рівноваги, невідомі шукані напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_t$  знаходяться розв'язуванням статично невизначених задач. Рівняння статки має наступний вигляд [1]

$$\sigma_r - \sigma_t + \frac{d\sigma_r}{dr} = 0. \quad (5.10)$$

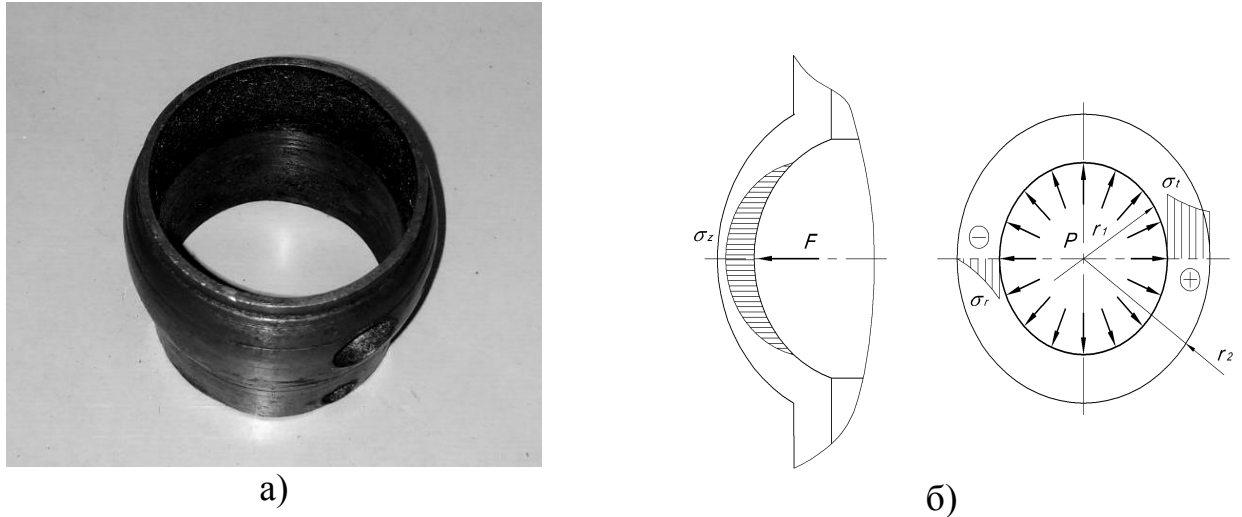


Рис.5.9. Загальний вигляд циліндричної втулки б)- розрахункова схема дії сил і напружень при розвальцьовуванні циліндричної втулки

Для визначення напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_t$  та ймовірного радіального переміщення довільної точки кільця нашого ролика з абсцисою  $r$  позначимо через  $u$ , а приріст цього переміщення за рахунок зміни координати  $r$  на величину  $dr$  буде  $du$ . Тоді відносні лінійні деформації у радіальному  $\varepsilon_r$  і тангенціальному  $\varepsilon_t$  напрямках виражаються через переміщення  $u$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \quad \varepsilon_t = \frac{u}{r}. \quad (5.11)$$

Для визначення діючих напружень можна скористатися законом Гука [68] і у нашому випадку для напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_t$  залежності мають наступний вигляд

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right); \quad \sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} \right), \quad (5.12)$$

де  $E$  – модуль пружності;



$\mu$  - коефіцієнт Пуассона.

Підставивши вирази для напружень (5.11) у рівняння статки (5.10), отримаємо

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0. \quad (5.13)$$

Розв'язком даного диференціального рівняння другого порядку із змінними коефіцієнтами буде

$$u = c_1 r + \frac{c_2}{r}. \quad (5.14)$$

Шляхом підстановки виразу (5.14) у рівняння (5.12) отримаємо

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \left( c_1(1+\mu) - c_2 \left( \frac{1-\mu}{r^2} \right) \right); \\ \sigma_t &= \frac{E}{1-\mu^2} \left( c_1(1+\mu) + c_2 \left( \frac{1-\mu}{r^2} \right) \right). \end{aligned} \quad (5.15)$$

Сталі інтегрування  $c_1$  і  $c_2$  знаходяться із граничної умови на внутрішньому контурі ролика  $\sigma_r(r) = P_1$  і  $\sigma_t(r) = P_1$ .

Відповідно формули для визначення напружень мають наступний вигляд

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_r \\ \sigma_t \end{array} \right\} = \frac{P_1 \cdot r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 \pm \frac{r_2^2}{r^2} \right), \quad (5.16)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – відповідно початковий і кінцевий радіуси отвору ролика.

Перпендикулярно до осі ролика діє поздовжня сила  $F$  і у поперечних перерізах діють напруження  $\sigma_z$ , які визначаються за формулою

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (5.17)$$

Напруження  $\sigma_r$  – розтягуючі,  $\sigma_t$  – стискуючі. Максимальні значення цих напружень виникають на внутрішньому контурі і вони рівні

$$\sigma_r = -F; \quad \sigma_t = F \frac{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}. \quad (5.18)$$

Перевірку міцності стінки ролика можна провести за теорією міцності Мора [2]. Відповідно отримаємо

$$\sigma_t - \sigma_r \leq [\sigma] \text{ або } \frac{2F}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \leq [\sigma], \quad (5.19)$$

де  $[\sigma]$  – максимально допустиме напруження матеріалу ролика.

Відповідно користуючись наведеними залежностями задаючись необхідним діаметром кола (заданого через радіус) і відношенням  $r_1/r_2$ , можна з формул (5.18) або (5.19) визначити величину необхідного діаметра втулки для забезпечення міцності стінки. Графічні взаємозалежності співвідношення радіусів розвальцьовуваного отвору та залежність зміни зусилля розвальцювання від допустимого напруження матеріалу – на рис.5.10.

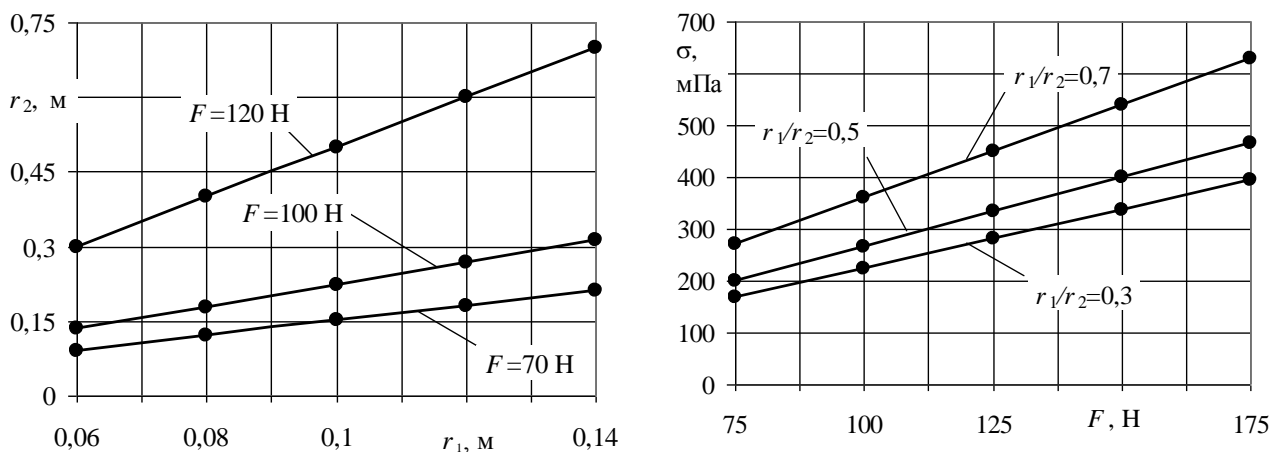


Рис. 5.10. Графічні співвідношення радіусів розвальцьовуваного отвору а) та залежність зміни зусилля розвальцювання від допустимого напруження матеріалу б)

Встановлено, що при відношенні  $r_1/r_2 = 0$  внутрішнє навантаження не повинно перевищувати  $0,5F$  за теорією найбільших дотичних напружень або ж

$0,58F$  – за енергетичною теорією міцності. Для відповідного розміру розвальцьованого отвору збільшення діаметра втулки не забезпечить збільшення міцності шляхом збільшення товщини стінки

#### **5.4. Технологічне оснащення для контролю якості деталей гвинтових механізмів**

Розроблена удосконалена конструкція шнекоміра [109] (рис. 5.11), який виконано у вигляді нерухомої 1 і рухомої 2 губок, товщина яких є більшою кроку шнека і штанги 3, яка жорстко з'єднана з нерухомою губкою. На штанзі 3 встановлена рухома рамка 4 з ноніусом 5, яка переміщується по штанзі, з низу якої виконана рейка 6, яка є у взаємодії з шестернею 7 з можливістю кругового провертання. Шестерня центральним отвором жорстко встановлена на вісь 9 разом з конічним ноніусом 5 з можливістю кругового провертання в рухомій рамці 4. Остання на штанзі жорстко кріпиться стопорним гвинтом 10, а між губками 1 і 2 встановлено вимірювальний шнек 11 у вигляді гвинтового робочого органу.

Робота шнекоміра здійснюється наступним чином. Губки 1 і 2 своїми площинами контактують з зовнішнім розміром шнека 11. При цьому останній базується з прямокутною базуючою призмою 12. За допомогою шестерні 7, яка приводить рухому рамку 4 з ноніусом 5 переміщуються вліво для забезпечення контакту губок з зовнішнім діаметром шнека 11. При збільшенні зусилля провертання більше потрібного спрацьовує відомий механізм тріскачки конічного ноніуса 5.

Для заміру точності шнеків використовують індикатор 14, Altivar 15 і персональний комп'ютер 16. До переваг шнекоміра належить розширення технологічних можливостей і здійснення замірів і кроку шнека.

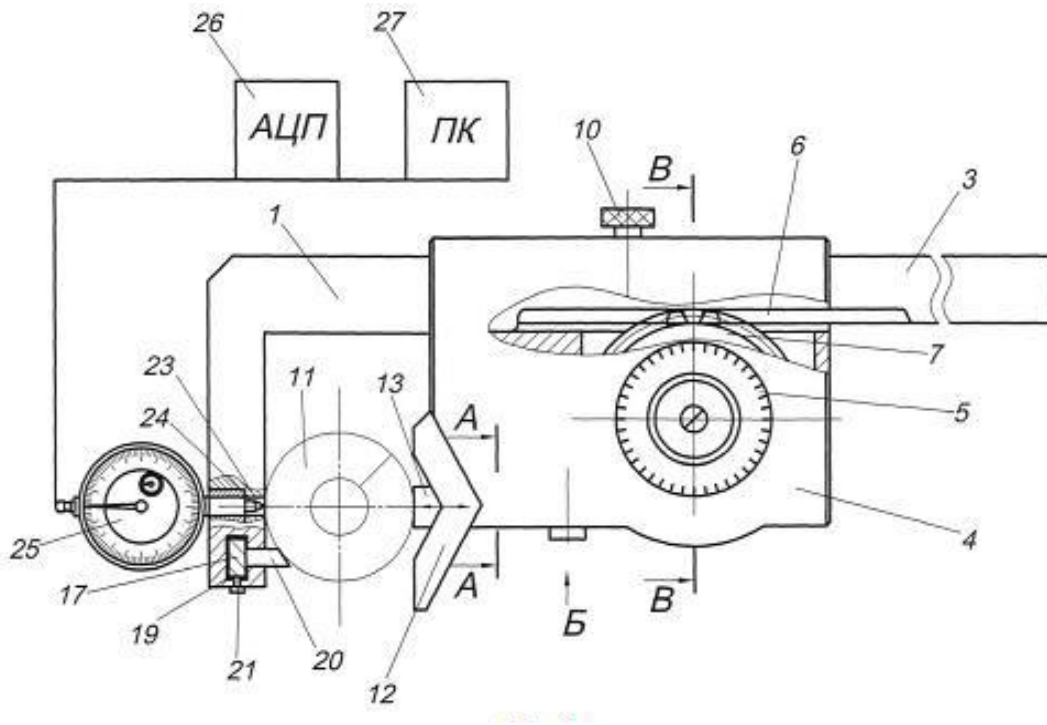


Рис. 5.11. Шнекомір

Сумарна похибка закріплення вала у пристрої знаходиться за формулою [9]:

$$\varepsilon_3 = \cos \beta (\varepsilon_{30} + \varepsilon_{34}), \quad (5.20)$$

$$\varepsilon_{30} = \sqrt{(\varepsilon_3')^2 + (\varepsilon_3'')^2 + (\varepsilon_3''')^2}, \quad (5.21)$$

де  $\beta$  - кут між напрямком виконуваного розміру і напрямком найбільшого зміщення;

$\varepsilon_{30}$  - основна випадкова складова похибки закріплення;

$\varepsilon_{34}$  - випадкова похибка закріплення, яка пов'язана зі зміною форми поверхні контакту установчого елемента при його зношенні;

$\varepsilon_3', \varepsilon_3'', \varepsilon_3'''$  - відповідно похибки закріплення непостійною силою затиску, неоднорідності шорсткості заготовки і неоднорідністю хвилястої заготовки. До переваг шнекоміру відноситься розширення технологічних можливостей і здійснення замірів і кроку шнека.

Індикатор універсальний зображено на (рис. 5.12), який виконаний у вигляді штанги 1, на якій нанесені мірні мітки 2, з лівого кінця приладу на штанзі 1 жорстко закріплено корпус лівої каретки 3 відомим способом. В середині корпуса перпендикулярно до штанги виконано наскрізний отвір 4, в який встановлено лівий вимірювальний елемент, який виконано у вигляді двоплечого важеля 5 з центральним отвором 6 перпендикулярним до штанги на нерухомій осі 7 з можливістю коливних переміщень, нижній вимірювальний кінець якого має форму щупа 8. У верхній частині двоплечий важіль 5 лівого торця є у взаємодії з ніжкою 9 індикатора 10, який жорстко закріплений в корпусі лівої каретки 3. На штанзі справа встановлена права каретка 11 з можливістю осевого переміщення, в корпусі якої перпендикулярно до штанги 1 виконано центральний отвір 12, який є у взаємодії з упором 13, нижній кінець якого має форму щупа 8 лівого двоплечого важеля 5. Крім цього до правого торця правої нерухомої каретки під'єднано ноніус 14, хомут 15 зі стопорним гвинтом 16 і механізм точної настройки 17. Робота індикатора універсального здійснюється наступним чином.

Для прикладу розглянемо вимірювання довжини паза 18 оброблювальної деталі 19, яку встановлюємо на підставку, вимірювальні каретки зсувають до купи і встановлюють ніжки щупа 8 в середину паза 18, розсовують каретки до стику щупів 8 і за допомогою індикатора 10 фіксують відхилення величини паза 18 відносно норми. В разі потреби в залежності від конструктивних параметрів деталей і вимірювальних елементів щупа 8 можна змінювати. До переваг індикатора належить розширення технологічних можливостей і підвищення чутливості приладу і точності його роботи.

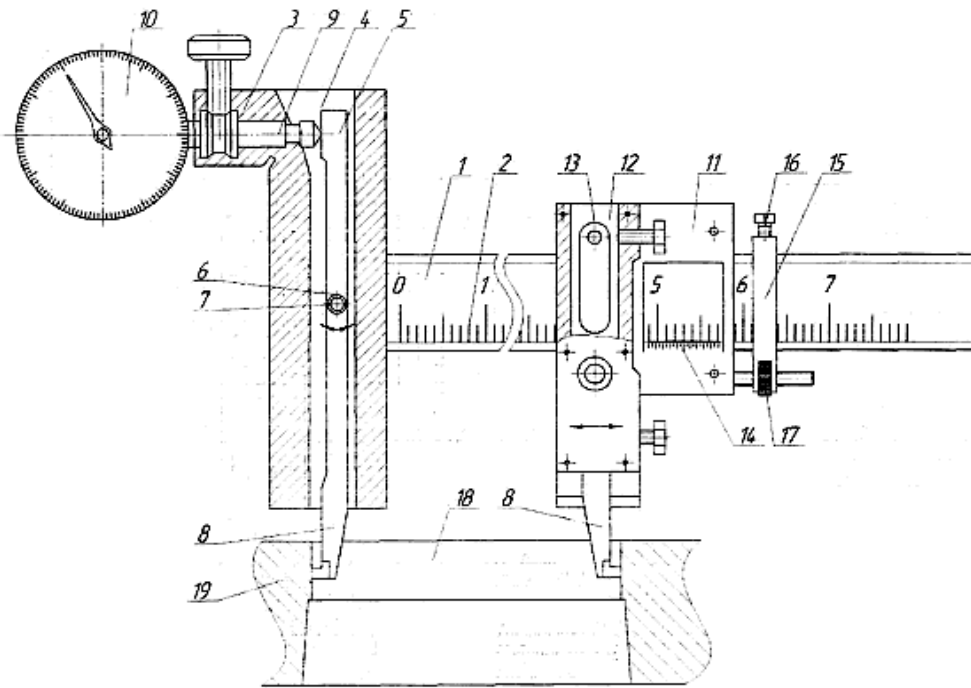


Рис. 5.12. Індикатор універсальний [107]

### 5.5. Техніко-економічна оцінка способу навівання спіралей шнеків обертовою втулкою

Гвинтові елементи виконуються циліндричної, еліпсної, конічної чи профільної форми і широко використовуються у якості основних деталей секційних гвинтових конвеєрів. Їх виготовляють методами штампування, навівання та прокатування.

Утворення гвинтових елементів методом штампування призводить до значних втрат матеріалу при вирубуванні кілець, а також низької якості звареної з кілець спіралі, у порівнянні із суцільно виготовленою. Також такий спосіб виробництва характеризується високою трудомісткістю і вартістю процесу. Прокатування спіралей на прокатних станах є технологічно обґрунтованим, коли йдеться про масове виробництво. Воно також є енерго- та капіталовитратним. Тому найбільш технологічними для серійного виробництва є методи формоутворення гвинтових елементів навіванням, що здійснюється зі стрічкової смуги. Відтак розроблення прогресивних способів навівання спіралей шнеків обертовою втулкою є актуальним і сприяє отриманню

енергоощадних високопродуктивних технологій.

Проведемо техніко-економічне порівняння процесів навивання спіралей шнеків обертовою втулкою (проектний варіант) та на оправу (базовий варіант). При цьому у якості базової моделі верстата, на якому проводитиметься розрахунок вартості навивання, обрано верстат моделі 16E16КП. Також для забезпечення процесу навивання слід використовувати спеціальне оснащення. У базовому варіанті це буде оправка з направляючим та притискним роликком [86], а в проектному варіанті оправка, кріпильна, опорна з формоутворюючими роликами та обертовою втулкою [39]. Відносна вартість спеціального оснащення у проектному варіанті є дещо вищою, аніж у базовому.

Проведемо орієнтовний підрахунок вартості варіантів способів навивання гвинтових спіралей по базовому та проектному варіантах при виготовленні спіралі товщиною 2 мм, висотою витка 30 мм, зовнішнім діаметром 100 мм, з матеріалу - сталь 08кп, стрічки довжиною 3 м. Для цього наявні дані виконання технологічного процесу навивання представимо в таблиці 5.4 (вони є порівняльними і можуть коректуватись у залежності від зміни вартості оснащення, обладнання, тривалості операцій тощо). Крім того, виконання порівняльного розрахунку нами проводилось лише по окремих відмінних операціях технологічного процесу (аналогічні операції по тривалості і використанню інструментарію не розглядаються, як наприклад, калібрування спіралі).

Проведемо підрахунок по окремих відмінних операціях технологічного процесу навивання гвинтових спіралей:

1. Витрати на заробітну плату робітника, зайнятого виконанням операції навивання, визначатимуться за формулою [32]:

$$З = \sum T_i \cdot T_{c1} \cdot K_i \cdot K_n,$$

де  $Z$  - затрати на зарплату робітника;  $T_i$  - трудомісткість  $i$ -ї операції чи переходу, год.;  $T_{c1}$  - величина тарифної ставки 1-го розряду (з 01.01.2020 р. - 28,11 грн./год. [<https://index.minfin.com.ua/ua/labour/social/>]);  $K_i$  - тарифний

коефіцієнт і-го розряду ( $K_i = 1,35$  для 4 розряду);  $K_n$  – коефіцієнт, що враховує єдиний соціальний внесок (1,22).

Витрати на заробітну плату по базовому варіанті становитимуть:

$$Z_6 = (131 / 3600) \cdot 28,11 \cdot 1,35 \cdot 1,22 = 1,68 \text{ грн.}$$

Витрати на заробітну плату по проектному варіанті становитимуть:

$$Z_{\text{п}} = (114 / 3600) \cdot 28,11 \cdot 1,35 \cdot 1,22 = 1,47 \text{ грн.}$$

2. Витрати на електроенергію при вказаних параметрах визначатиметься за формулою [32]:

$$K = \sum T_i \cdot C_{\text{ел.ен}} \cdot V_{\text{к.год}}$$

де  $C_{\text{ел.ен}}$  – ціна 1 кВт/год. електроенергії (середня ціна купівлі електричної енергії на балансуєчому ринку для промислових та прирівняні до них споживачі з 01.03.2020р. - 2,09 грн. [<https://www.hoe.com.ua/page/tarifi-2>]);  $V_{\text{к.год}}$  – приведений обсяг споживання електроенергії обладнанням при виконанні операції, кВт/год.

Таблиця 5.4

Дані для порівняння варіантів способів навивання гвинтових спіралей

Дані для розрахунку	Базовий варіант (навивання на оправу)	Проектний варіант (навивання обертовою втулкою)
Витрати електроенергії, год./кВт	3,61	3,26
Тип і марка обладнання	токарно-гвинто-різний верстат мод. 16E16КП	токарно-гвинто-різний верстат мод. 16E16КП
Технологічне оснащення	оправа, направляючий та притискний ролики	оправа, кріпильна, опорна з формуютьворюючими роликами та обертова втулки
Вартість технологічного оснащення, грн.	2150	3730
Тривалість операції (включаючи закріплення полоси, навивання та зняття щільного пакету), с	131	114
Розряд робітника	4	4



Витрати на електроенергію по базовому варіанті становитимуть:

$$K_{\text{б}} = (131 / 3600) \cdot 2,09 \cdot 3,61 = 0,27 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію по проектному варіанті становитимуть:

$$K_{\text{п}} = (114 / 3600) \cdot 2,09 \cdot 3,26 = 0,22 \text{ грн.}$$

3. Затрати на амортизацію обладнання (оснащення) визначаємо з залежності [3]:

$$A = B_0 \cdot K_a \cdot \Sigma T_i / T_d,$$

де  $B_0$  - вартість оснащення, яке призначене для технологічного процесу, грн.;  $K_a$  - коефіцієнт амортизації, 0,2;  $T_d$  - час роботи оснащення протягом року, 2070 год.

Витрати на амортизацію обладнання (оснащення) по базовому варіанті становитимуть:

$$A_{\text{б}} = 2150 \cdot 0,2 \cdot ((131 / 3600) / 2070) = 0,008 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію обладнання (оснащення) по проектному варіанті становитимуть:

$$A_{\text{п}} = 3730 \cdot 0,2 \cdot ((114 / 3600) / 2070) = 0,011 \text{ грн.}$$

Провівши розрахунки за елементами витрат виконання окремих операцій по базовому та проектному варіантах технологічних процесів навивання гвинтових спіралей, їх результати відобразимо в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Підрахунок за елементами окремих витрат виконання окремих операцій технологічних процесів навивання гвинтових спіралей

Елементи витрат	Базовий варіант (навивання на оправу)	Проектний варіант (навивання обертовою втулкою)
Витрати на заробітну плату	1,68	1,47
Витрати на електроенергію	0,27	0,22
Витрати на амортизацію обладнання (оснащення)	0,01 (0,008)	0,01 (0,011)
Разом витрат	1,96	1,7

Проведемо підрахунок річного економічного ефекту:

1. Річний економічний ефект при заміні базового варіанту на проектний (при роботі обладнання в одну зміну):

$$E_{p1} = (2070 / (114 / 3600)) \cdot (1,96 - 1,7) = 16995,79 \text{ грн.}$$

## 5.6. Висновки

1. Приведена комп'ютерна модель секційних робочих органів гвинтових конвеєрів. Встановлено, що при збільшенні крутного моменту зростає кут закручування секцій. Приведені аналітичні залежності для визначення конструктивних і силових параметрів гвинтових елементів робочих органів. Встановлено, що найбільше його зростання спостерігається для кута конуса  $\alpha = 5$ , а найменше – для  $b = 4$ мм. Одержані результати в порівнянні з теоретичними та експериментальними дослідженнями та комп'ютерного моделювання встановлено, що подібність одержаних результатів подібності між розрахункових та експериментальних становить 8..14%.

2. Розроблено технологічне оснащення для контролю якості деталей гвинтових механізмів, а саме шнекомір, індикатор універсальний для контролю гвинтових механізмів. Наведено показник технологічності та конструктивної складності виготовлення гвинтових заготовок. При виготовленні ГСРО з гвинтової стрічки, отримано основні способи виготовлення за конструктивними параметрами. Обґрунтовані технологічні методи технологічності для підвищення експлуатаційної надійності та довговічності гвинтових робочих органів.

3 Розроблено інженерну методику проектування ГСРО. Виведено аналітичні залежності для визначення параметрів досліджуваної пружини, навантаження на ролик для забезпечення ефективного технологічного процесу виготовлення гвинтового секційного робочого органа. Наведені прогресивні конструкції гвинтових секційних робочих органів, що забезпечить отримання

найбільш раціональних конструктивних рішень при економії витрат, зусиль, часу та інших факторів.

4. Розроблена техніко-економічна оцінка спеціальних робочих органів секційних гвинтових конвеєрів. Основні вимоги до них: велика продуктивність, мінімальні енерговитрати при виготовленні, міцність, надійність і довговічність. Результати дослідження впроваджено в конструкції нових типів механізмів та частково на ТДВ «Булат» (смт. Микулинці) з річним економічним ефектом 16995,79 грн. Технічна новизна розроблень захищена 5 патентами України на корисні моделі.

## 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)  $M_{зг}$  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  $M_{зг}$  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 оправи, 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 роликом знаходиться в межах  $P_1 = 1500 - 1800$  Н, а момент, який необхідно прикласти для обертання оправи  $M_{кр} = 55 - 72$  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 навівання 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  $M_{z2}$  процесу навівання 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 навівання знаходиться в межах від 399 до 511 Н·м, а для сталі Ст 3 значення крутного моменту навівання 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  $\alpha$  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» (смт. Микулинці).

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Аверкиев Ю. А. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.1
2. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
3. Альтшуллер Г. С. Алгоритм изобретения / Г. С. Альтшуллер. – М. : Московский рабочий, 1972. – 296 с.
4. Андрейчиков А. В. Интеллектуальный метод синтеза технологических инноваций / А. В. Андрейчиков // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 2003. – №10. – С. 47-62.
5. Арзамасов Б. Н. Конструкционные материалы / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем. – М. : Машиностроение, 1990. – 688 с.
6. Асташев В. К. Динамика машин и управление машинами: Справочник / В. К. Асташев, В. И. Бабицкий. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
7. Барташев Л.В. Технично-економические расчеты при проектировании и производстве машин / Барташев Л. В. – М. : Машиностроение, 1973. – 354с.
8. Безухов И. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Безухов И. И. – М. : Высшая школа, 1968. – 512 с.
9. Белый И. В. Основы научных исследований и технического творчества / И. В. Белый, К. П. Власов, В. Б. Клепиков. – Х. : Вища школа, 1989. – 200 с.
10. Бирюков Б. Н. Машины, создающие машины / Б. Н. Бирюков. – К. : Техніка, 1987. – 143 с.
11. Боженко Л. Т. Технологія машинобудування. Проектування та виробництво заготовок: Підручник / Боженко Л. Т. – Львів : Світ, 1996. – 368 с.
12. Бочвар А. А. Металловедение / Бочвар А. А. - М. : Металлургиздат, 1956. – 495 с.
13. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев – М. : Наука, 1981. – 720 с.



- 14.Брушлинский А. В. Мышление и прогнозирование / А. В. Брушлинский. – М. : Мысль, 1979. – 173 с.
- 15.Буш Г. Я. Основы эвристики для изобретателей / Г. Я. Буш. – Рига : Знание, 1977. – 164 с.
- 16.Вітровий А.О. Обґрунтування параметрів технологічного процесу роботи модульного гвинтового агрегату. Дис. канд. техн. наук: 05.20.01.- Луцьк, 1999.- 138с.
- 17.Васильків В. В. Нові технологічні процеси виготовлення широко стрічкових спіралей шнеків / В. В. Васильків, О. М. Лясота // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво : всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція. – Одеса, 2007. – С. 47-48.
- 18.Васильків В. В. Технологічне забезпечення виробництва гвинтових заготовок з листового прокату: дис. кандидата техн. наук : 05.02.08 / Васильків Василь Васильович. – Тернопіль, 2005. – 263 с.
- 19.Васильків В. Синтез схем формоутворення гвинтових заготовок / В.Васильків // Обробка матеріалів тиском. – №1(22) – 2010. – С. 167 –173.
- 20.Васильків В. Структура геометричного моделювання об'єктів в уніфікаційному синтезі / В. Васильків // Праці 9-го Міжнародного симпозиуму українських інженерів – механіків у Львові. – Львів, 2009. – С. 158-160.
- 21.Васильків В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08 / Василь Васильович Васильків; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». – Львів, 2015. – 600 с.
- 22.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.
- 23.Гавриш А.П., Двойных Н.А. Автоматические грузочные устройства для промышленных роботов. -К.: Техніка, 1985, - 176 с.

24.Гевко Б. М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б. М. Гевко, Р. М. Рогатынский. – Львов : Вища школа, 1989. – 176 с.

25.Гевко Б. М. Динаміка процесу розточування гвинтових гофрованих заготовок / Б. М. Гевко, А. Є. Дячун // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2008. - Т.13, №1. – С. 70-79.

26.Гевко Б. М. Динамічна модель профілювання робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів при виготовленні і відновленні / Б. М. Гевко, І. Я. Новосад, А. Є. Дячун // Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха, 2007. – № 91. – С. 299-304.

27.Гевко Б. М. Технология изготовления спиралей шнеков / Гевко Б. М. – Львов : Вища школа, 1986. – 128 с.

28.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.

29.Гевко Б.М. Научные основы разработки винтовых транспортирующих механизмов сельскохозяйственных машин: Дис...д-ра техн. наук: 05.05.11 - Ростов-на-Дону, 1987. –450 с.

30.Гевко Б.М. До питання профілювання секційних робочих органів гвинтових подаючих механізмів / Б.М.Гевко, Р.Я. Лещук // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"). Луцький ДТУ, №12. – Луцьк, 2003. – С. 32 – 39.

31.Гевко Б.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б.М.Гевко, Р.М.Рогатынский // Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. –176 с. 21-23(15,19,21)

32.Гевко І. Б. Організація виробництва: теорія і практика: підручник / І. Б. Гевко, А. О. Оксентюк, М. П. Галушак. – К. : Кондор, 2008. – 178 с.

33.Гевко І. Б. Управління процесом розробки і освоєння виробництва нових виробів: підручник / І. Б. Гевко, Б. М. Гевко. – Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2010. – 199 с.

34.Гевко І.Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми. Розрахунок і конструювання./ І.Б.Гевко //ТДТУ ім. Івана Пулюя, 2008 - 307с.

35.Гевко Ів. Б. Синтез способів навивання спіралей шнеків./ Ів. Б.Гевко, В. З.Гудь, О. А.Круглик // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2018. Випуск 12. С. 39-47.

36.Гевко Ів. Б. Спосіб навивання спіралей шнеків робочих органів сільськогосподарських машин та механізмів. / Ів. Б.Гевко, О. А.Круглик, В. З. Гудь, Т. С. Дубиняк // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2019. Випуск № 198. С. 261-366.

37.Гевко Ів. Синтез способів навивання гвинтових заготовок / Ів. Гевко, О. Катрич// Вісник ТНТУ – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – Том 80. – № 4. – Ст. 153-160.

38.Герман Х. Шнековые машины в технологии ФРГ. / Х.Герман //– Л.: Машиностроение, 1975. -280с.

39.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.

40.Голубенцев А. Н. Динамика переходных процессов в машинах со многими массами / Голубенцев А. Н. – М. : МАШГИЗ, 1959. – 180 с.

41.ГОСТ 1050-90. Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении.– М.: Изд-во стандартов, 1990.- – 25с.

42.Гоффман О. Введение в теорию пластичности для инженеров / Г. Закс, О. Гоффман ; [пер. с англ. под. ред. З. И. Григолюка]. – М. : Машгиз, 1957. – 279 с.

43. Григорьев А. В. И/ИЛИ-дерево как средство абстрактного представления знаний / А. В. Григорьев, А. А. Каспаров // Сб. трудов Донецкого национального технического университета. – Серия «Информатика, кибернетика та обчислювальна техніка». – 2002. – Выпуск 39. – С. 36–42.

44. Григорьев А.М. Гибкие шнеки / А.М.Григорьев, П.А. Преображенский // – К.: Знание, 1967. – 245 с.

45. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов : в 3 т. / Губкин С. И. – М. : Металлургия, 1960 - .Т.1. – 1960. – 376 с.

46. Гудь В. З. Динамічна модель процесу перервного розточування спірального шнека / В. З. Гудь // Вісник Луцького аграрного університету. – Луцьк, 2003. - С. 36-42.

47. Гудь В. З. Технологічні особливості навівання гвинтових елементів шнекових механізмів / В. З. Гудь // Наукові нотатки. – Луцьк, 2002. - № 11. – С. 107-113.

48. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Гун Г. Я. - М. : Металлургия, 1980. – 456 с.

49. Гупка А. Б. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових заготовок / О. Л. Ляшук, А. Г. Палюх, А. Б. Гупка // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир, 2015. – Вип. 1 (70). - С. 27-31.

50. Данильченко Л. М. Технологічне забезпечення точності формоутворення витих заготовок: дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Данильченко Лариса Миколаївна. – Львів, 2000. – 175 с.

51. Джонс Д. К. Методы проектирования / Д. К. Джонс [пер. с англ. 2-е изд.]. – М. : Мир, 1986. – 326 с.

52. 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.

53. Дичковський М. Г. Технологічна оснастка. Проектно-конструкторські розрахунки пристосувань: навчальний посібник / Дичковський М. Г. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2001. – 277 с.

54. Дмитрів Д. В. Технологічні основи виготовлення спіралей шнеків із змінними параметрами для гвинтових змішувачів / Д. В. Дмитрів // Зб. наук. пр. Національного аграрного університету "Сучасні проблеми сільськогосподарського машинобудування". – К., 1997. – Т.1. - С. 71 - 73.

55. 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.

56. 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.

57. 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.

58. Драган А.П. Теоретичні передумови технологічного процесу виготовлення гвинтових гофрованих заготовок: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Драган Андрій Петрович; Тернопільський держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя. – Т., 2007. – 198 с.

59. Дунаев П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин / П. Ф Дунаев, О. П. Леликов. – М. : Машиностроение, 1985. – 360 с.

60. Душинський В. В. Основи наукових досліджень. Теорія і практикум з програмним забезпеченням / Душинський В. В. – К. : НТУУ "КПІ", 1998. – 408 с.

61.Дячун А.Є. Обґрунтування параметрів технологічного процесу виготовлення профільних гвинтових заготовок: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Дячун Андрій Євгенович; ТДТУ ім. І. Пулюя. – Т., 2008. – 208 с.

62.Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением / Евстратов В. А. – Харьков: Вища школа. Изд. при Харьк. ун-те, 1981. – 248 с.

63.Егоров В.А. Об изготовлении винтовых лент прокаткой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. –1972. - № 12. - С.41 - 43.

64.Журавлев А.З., Верзилов Ю.Н., Егоров В.А. Изготовление шнеков для зерноуборочных комбайнов // Кузнечно-штамповочное производство.–1980.- №5. - С. 29 - 31.

65.Зайков М.А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке. Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 300 с.23-53

66.Закс Г. Пластическое металловедение / Закс Г. – М. : ОНТИ, 1938. – 244 с.

67.Зибель Э. Обработка металлов в пластическом состоянии / Зибель Э. – М. : ОНТИ, 1934. – 194 с.

68.Зубцов М. Е. Листовая штамповка / Зубцов М. Е. – Л. : Машиностроение, 1980. – 432 с.

69.Ильюшин О. А. Пластичность.Ч.1. / Ильюшин О. А. - М.-Л. : ГТИ, 1984.- 346 с.

70.Казачковський Н. Н. Програма PowerSuite для настройки преобразователей частоты и устройств плавного пуска (версия 2.3.0): методичні вказівки [для слухачів курсів підвищення кваліфікації та студентів спеціальності 7.092203 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривід»] / Н. Н. Казачковський, Д. В. Якупов. – Дніпропетровськ : НГУ, 2006. – 45 с.

71.Капаціла Ю.Б. Розробка і дослідження технологічних процесів багатофункціональних агрегатів для кормовиробництва: Дис канд. техн. наук: 05.05.11.- Луцьк, ЛДТУ.- 1999.- 138с.

72.Кіндрацький Б. І. Концепція і алгоритм багатокритеріального структурно-параметричного синтезу машинобудівних конструкцій / Б. І. Кіндрацький // Вісник ТДТУ. –2003. – Т. 8. – № 1. – С. 73–82.

73.Кіндрацький Б. І. Раціональне проектування машинобудівних конструкцій / Б. І. Кіндрацький, Г. Т. Сулим. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2003. – 280 с.

74.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.

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

76.Клендій М.Б. Обґрунтування параметрів перевантажувального патрубку гвинтового конвеєра. Дис. канд. техн. наук: 05.05.05.- Тернопіль, ТДТУ.- 2007.-137с.

77.Комаров М. С. Динамика машин / Комаров М. С. – М. : Машиностроение, 1979. – 342 с.

78.Корн Н. Справочник по математике / Н. Корн, Т. Корн. – М. : Мир, 1970. – 540 с.

79.Корсаков В. С. Точность механической обработки / Корсаков В. С. – М. : Машгиз, 1961. – 379 с.

80.Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков – М. : Машиностроение, 1985–.-Т. 1. – 1985. – 985 с.

81.Кочубинська О. П. Методика визначення складової сили різання при проточуванні гвинтових робочих органів машин / О. П. Кочубинська, А. Є. Дячун, О. В. Фльонц // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2007. - № 20. – С. 80-82.

82.Кузнецов Ю. М. Прогнозування розвитку технічних систем / [Ю. М. Кузнецов, Р. А. Склярів]; під заг. ред. Ю. М. Кузнецова. – К. : ТОВ «ЗМОК». – ПП «ГНОЗІС», 2004. – 323 с.

83.Кузнецов Ю. М. Теорія технічних систем / [Ю. М. Кузнецов, І. В. Луців, С. А. Дубиняк]; під заг. ред. Ю. М. Кузнецова. – Тернопіль : ТНТУ, 1997 – 310 с.

84.Лейбензон Л. С. Курс теории упругости / Лейбензон Л. С. - М. : Гостехтеориздат, 1947. – 464 с.

85.Лещук Р.Я. Обґрунтування конструктивно-силових параметрів секційних робочих органів гвинтових перевантажувальних механізмів. Дис.канд.тен.наук: 05.02.02.- Львів, ЛНТУ “Львівська політехніка”.- 2004.-148с.

86.Механізми з гвинтовими пристроями /Гевко Б.М., Данильченко М.Г., Рогатинський Р.М., Пилипець М.І., Матвійчук А.В. - Львів : Світ, 1993. -208с

87.Лысовой М. Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / Лысовой М. Н. – М. : Машиностроение, 1966. – 236 с.

88.Лясота О. М. Технологічне забезпечення виробництва ширококутових профільних гвинтових заготовок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / О. М. Лясота. - Тернопіль, 2008. – 21 с.

89.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.

90.Малинин Н.Н., Ширшов А.А. Пластический изгиб листа при больших деформациях – Изв. вузов. Машиностроение, 1965. - №8. - с. 187-192.

91.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.

92.Механизация и автоматизация сборки в машиностроении /А.В.Воронин, А.И.Гречухин, А.С.Калашников и др. - М.: Машиностроение, 1985. - 272 с.



93. Мещерин В. Т. Листовая штамповка. Атлас схем. Изд. 3-е, испр. и доп. / Мещерин В. Т. – М. : Машиностроение, 1975. – 227 с.
94. Миякава Тэцуо, Ямамото Тосиро, Като Дзюньити // “Тэцу то Хаганэ. – Tetsu to hagane, J. Iron and Steel Inst/ Jap.”, 1976, №11, с.62.36-164
95. Мошнин Е. М. Гибка и правка на ротационных машинах / Мошнин Е. М. – М. : Машиностроение, 1977. – 269 с.
96. Мошнин Е.Н. Гибка, обтяжка и правка на пресах. – М.: Машгиз, 1959. – 360с.84-85
97. 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.
98. Навроцька Т.Д. Обґрунтування параметрів гнучких гвинтових робочих органів гвинтових конвеєрів / Т.Д. Навроцька // Матеріали III 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.
99. 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.
100. 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.
101. Новосад І. Я. Технологічне забезпечення виготовлення секцій робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів: дис. кандидата техн. наук : 05.02.08 / Новосад Іван Ярославович. – Тернопіль, 2007. – 229 с.

102. 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.

103. Павлище В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: Підручник / Павлище В.Т. – К. : Вища шк., 1993. – 556 с.

104. Павловський М. А. Теоретична механіка / Павловський М. А. – К. : Техніка, 2002. – 512 с.

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

106. 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.

107. Пат. №109876 Україна, МПК G01D 3/00 Індикатор універсальний / Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третьяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я.; Заявник і патентовласник Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третьяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я. – № u201602943, заявл. 22.03.2016, опубл. 12.09.2016, Бюл. №17.

108. 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.

109. 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 патентоотримувачі 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.

110. Пилипець М. І. Багатоваріантна структура верстато-інструментального спорядження для формоутворення навивних і кільцевих заготовок деталей машин / М. І. Пилипець, В. В. Васильків // Вісник НТУ “ХП”. – Харків, 2003. - №15. – С. 94-103.

111. Пилипець М. І. До питання теоретичного дослідження енергосилових параметрів процесів формоутворення навивних заготовок / М. І. Пилипець, В. В. Васильків, О. М. Лясота // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків, 2003. – № 20. – С. 370-375.

112. Пилипець М. І. Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин: дис. д-ра техн. наук : 05.02.08 / Михайло Ількович Пилипець. - Львів, 2002. – 445 с.

113. 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.

114. Підвищення технічного рівня гнучких гвинтових конвеєрів: монографія/ Гевко Р.Б., Вітровий А.О., Пік А.І.- Тернопіль: Астон, 2012.-204 с.

115. Підвищення технологічного рівня процесів завантаження та перевантаження матеріалів у гвинтових конвеєрах: монографія / Р.Б. Гевко, Р.М. Рогатинський, Р.І. Розум, М.Б. Клендій, О.М. Клендій, А.О. Вітровий – Тернопіль: Осадца Ю.В., 2018. – 180с.

116. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / [К. Хартан, Э. Лецкий, В. Шефер и др. ] ; [перевод с немецкого ].– М. : Мир, 1977. – 552 с.

117. Половинкин А. И. Основы инженерного творчества / Половинкин А. И. - М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.
118. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник / П. И. Полухин, А. М. Галкин. – М. : Metallurgy, 1983. – 350 с.
119. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Попов Е. А. – М. : Машиностроение, 1980. – 432 с.
120. Рене И.П. Изменение толщины листовой заготовки при чистом изгибе // Труды Тульского механического института. – 1950. – Вып.4. - С. 163-176.
121. Рене И.П. Пластический изгиб листовой заготовки // Труды Тульского механического института. – 1950. – Вып.4, С. 146-162.
122. Рогатинський Р. М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів із сировиною сільськогосподарського виробництва : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.20.01 «Піднімально-транспортні машини», 05.05.05 «Механізація сільськогосподарського виробництва» / Р. М. Рогатинський. – Київ, 1997. – 52 с.
123. Рогатинський Р.М. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів / Р.М. Рогатинський, І.Б. Гевко, А.Є. Дячун – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. – 278 с.
124. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520с.
125. Смирнов В. С. Теория обработки металлов давлением / Смирнов В. С. - М. : Metallurgy, 1973. – 496 с.
126. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Смирнов-Аляев Г. А. – М. : Машиностроение, 1968. – 272 с.
127. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А. А. - М. : Машиностроение, 1981. - 184 с.

128. 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.

129. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей / [Б. М. Гевко, О. Л. Ляшук, І. Б. Гевко та ін.]. – Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 367 с.

130. Томсен Э. Механика пластической деформации при обработке металлов / Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1969. – 503 с.

131. Унксов Е. П. Инженерная теория пластичности. Методы расчета усилия деформирования / Унксов Е. П. – М. : Машгиз, 1959. – 328 с.

132. Устройство для навивки ленты в спираль на ребро: А. с. 597465 СССР, МКИ В 21 D 11/06, В 21 F 3/02 / В.П.Мулин и Н.И. Черников (СССР) – №2412522/25; Заявлено 04.10.76; Оpubл. 15.03.78, Бюл. № 10.

133. Устройство для навивки ленты в спираль на ребро: А.с. №435887 СССР, МКИ В 21 f 3/02, В21 d 11/06 / И.И. Черников, В.П. Мухин, Ю.С. Радюченко (СССР) – №1807227/25-27; Заявлено 10.07.72; Оpubл. 15.07.74, Бюл. № 28.

134. Устройство для навивки ленты в спираль на ребро: А.с.435887 СССР МКИ В2f3 / 02В21d11/06(53) / Н.И. Черников, В.П.Мулин, Ю.С.Радюченко (СССР). -№1807227/25-27(22); Заявлено 10.07.72; Оpubл. 74, Бюл. №26.-31с.

135. Устройство для навивки спирали шнека: А.с.534277 СССР МКИ В21D11/06(53) 621.778.27 / А.Д.Щукин (СССР). -№2152125/25-27(22); Заявлено 07.07.75; Оpubл.76, Бюл. №41.-24с.

136. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Хилл Р. – М. : Гостехиздат, 1956. – 407с.

137. Церна А.Е. Исследование и освоение процесса холодной прокатки лент шнеков: Дис. канд.техн.наук. – Ростов-на-Дону: 1975. – 125 с.

138. Шевченко К. Н. Основы математических методов в теории обработки металлов давлением / Шевченко К. Н. – М.: Высшая школа, 1970. – 352 с.

139. Шифрин Д.Я., Гурвич В.Е., Нудель С.Н. Холодная вальцовка спиралей шнеков для самоходного кормоуборочного комбайна КСК-100 // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. - № 3. - С. 4 - 6.

140. Якімов О.В., Марчук В.І., Лінчевський П.А., Якімов О.О., Лашин В.М. Технологія машино та приладобудування. Луцьк 2005, 712 с.

141. Chris Rorres. The turn of the screw: optimal design of an Archimedes screw/ Jornal of hydrauling/ January 2000. P 72-80.

142. Europäische Patentanmeldung. O 187 889 A1. Schneckenfördervorrichtung. Anmeldetag: 16.4.85. Offentlegungstag: 23.07.86.

143. 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.

144. Kozyn, A., Holeyman A. and Lubitz, W. D. (2017). “A power loss model for Archimedes Screw 545 Generators”, Renewable Energy, 108, 260-273.

145. Erinofardi, E., Glawion H., Bismantolo, P., Date, A., Akbarzadeh, A., Mainil, A. K., 537 Suryono. A. F. (2017). “Experimental study of screw turbine performance based on 538 different angle of inclination”, Energy Procedia, 110, 8-13.

146. Pat. DD214307 Classification international: B21C37/26; B21C37/15; Vorrichtung zur herstellung spiralförmig auf rohroberflächen angeordneter metallrippen / Rosin Erwin; Kaufmann Hans; Kauschinger Martin Applicant: LEIPZIG CHEMIEANLAGEN; application number: DD19830248880 19830317; priority number: DD19830248880 19830317; publication date: 1984-10-10.

147. Pat W00131765 Also published as:- EP1222730 (A1) Classification international: H02K1/18; H02K15/02; H01F41/02; H02K1/18; Classification european: H02K15/02C1 Method for production of a band / Shen Jinxing; Oesterlein

Roland; Porteous Tom; Vedsted Flemming; Jacobsen Mogens F; Ikonen Ilkka  
Applicant: ABB RESEARCH LTD; Shen Jinxing; Oesterlein Roland; Porteous Tom;  
Vedsted Flemming; Jacobsen Mogens F; Ikonen Ilkka; application number:  
W02000EP10184 20001017; Priority number: DE19991051180 19991023;  
publication date: 2001-05-03.

# ДОДАТКИ



## ДОДАТОК А



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **98974** (13) **U**  
(51) МПК  
**G01B 3/20** (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2014 13360</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>12.12.2014</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>12.05.2015</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>12.05.2015, Бюл.№ 9</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Дячун Андрій Євгенович (UA), Тарасюк Юрій Миколайович (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна (UA), Кучвара Іван Миколайович (UA), Клендій Володимир Миколайович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>Дячун Андрій Євгенович, вул. Сонячна, 3, с. Нижчі Луб'янки, Збаразький р-н, Тернопільська обл., 47361 (UA), Тарасюк Юрій Миколайович, вул. Данила Нечая, 19, с. Бохоники, Вінницький р-н, Вінницька обл., 23233 (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна, вул. І. Сірка, 10/2, м. Тернопіль, 46000 (UA), Кучвара Іван Миколайович, вул. Канадська, 6, м. Тернопіль, 46000 (UA), Клендій Володимир Миколайович, вул. Шашкевича, 18, м. Березани, Тернопільська обл., 47501 (UA)</b></p>
---	--

**(54) ШНЕКОМІР****(57) Реферат:**

Шнекомір виконано у вигляді штанги з масштабною лінійкою, нерухомої і рухомої губок, рами зі шкалою ноніуса, стопорного гвинта, а знизу рухомої рамки виконана рейка. Товщина нерухомої і рухомої губок є більшою кроку шнека. Посередині довжини рухомої ніжки в сторону вимірювальної деталі встановлено прямокутну базуючу призму, при вершині якої встановлено плаваючий вимірювальний елемент, підпружинений в сторону вимірювальної поверхні. Внизу в нерухомій ніжці по її довжині виконано Т-подібний паз, який є у взаємодії з штангою, на якій нанесено шкалу ноніуса для вимірювання кроку шнека з радіальним упором з можливістю осьового переміщення і стопорним гвинтом. При цьому у нерухомій губці виконано наскрізний ступінчастий отвір в зоні зовнішнього діаметра шнека, який є у взаємодії з ніжкою профілометра, яка з нерухомою і рухомою губками під'єднані до аналого-цифрового перетворювача і персонального комп'ютера.

**UA 98974 U**



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **108422** (13) **U**  
(51) МПК  
**B24B 39/04** (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2016 01511</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>18.02.2016</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>11.07.2016</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>11.07.2016, Бюл.№ 13</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): Ляшук Олег Леонтійович (UA), Сокіл Марія Богданівна (UA), Третяков Олександр Леонідович (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна (UA), Клендій Володимир Миколайович (UA), Марчук Роман Миколайович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Ляшук Олег Леонтійович, вул. Б. Лепкого, 6/127, м. Тернопіль, 46000 (UA), Сокіл Марія Богданівна, вул. Замонастирська, 15, м. Тернопіль, 46000 (UA), Третяков Олександр Леонідович, вул. Б. Бойчулів, 5, м. Тернопіль, 46020 (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна, вул. І. Сірка, 10/2, м. Тернопіль, 46020 (UA), Клендій Володимир Миколайович, вул. Тарнавського, 7-а, м. Тернопіль, 46020 (UA), Марчук Роман Миколайович, вул. Шептицького, 13, м. Тернопіль (UA)</p>
--	--

**(54) ОБКАТНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ГВИНТОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ**

**(57) Реферат:**

Обкатний інструмент для зміцнення гвинтових робочих органів виконано у вигляді диска, встановленого на осі, на периферійній поверхні якого виконані радіальні отвори, які розміщені рівномірно по колу і в які встановлені деформуючі елементи, які притиснуті пружними елементами з можливістю осьового переміщення. Центральний отвір диска заповнений мастилом під тиском, а по зовнішньому його діаметру співвісно встановлено пружне кільце з відкритою зоною, де кінець зони виконано з радіусним виступом для збільшення сили удару, а початок з загостреним кінцем для плавного його заходу, а в зоні дії деформуючих елементів встановлено гвинтовий робочий орган, торцева діаметральна поверхня якого є у взаємодії з півкруглою поверхнею деформаційних елементів, кінці яких виконані плоскими і є загартованими і вони є у періодичній взаємодії з зовнішньою поверхнею гвинтового робочого органу при їх прокручуванні. Останній встановлено в центрах і направляючих з можливістю їх прокручування і осьовою подачею. З протилежної сторони від зони зміцнення зовнішньої поверхні гвинтовий робочий орган є у взаємодії з опорним роликом, співвісним з гвинтовим робочим органом довжиною 3...5 витків шнека є з ним у взаємодії при обертанні і вигладжуванні.

UA 108422 U



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **109876** (13) **U**  
(51) МПК (2016.01)  
**G01D 3/00**

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2016 02943</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>22.03.2016</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>12.09.2016</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>12.09.2016, Бюл.№ 17</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Ляшук Олег Леонтійович (UA), Марчук Назар Миколайович (UA), Третьяков Олександр Леонідович (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна (UA), Галан Юрій Ярославович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>Ляшук Олег Леонтійович, вул. Б. Лепкого, 6/127, м. Тернопіль, 46000 (UA), Марчук Назар Миколайович, вул. Шептицького, 13, м. Тернопіль, 46008 (UA), Третьяков Олександр Леонідович, вул. Братів Бойчуків, 5-а/82, м. Тернопіль, 46000 (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна, вул. І. Сірка, 10/2, м. Тернопіль, 46000 (UA), Галан Юрій Ярославович, вул. Б. Лепкого, 6/132, м. Тернопіль, 46000 (UA)</b></p>
--	--

**(54) ІНДИКАТОР УНІВЕРСАЛЬНИЙ**

**(57) Реферат:**

Індикатор універсальний виконано у вигляді штанги з двома каретками, вимірювальних вузлів і індикатора, напрямних кріпильних елементів і упора. На штанзі нанесені розмірні мітки і корпус лівої каретки жорстко закріплений до штанги відомим способом, а ліва вимірювальна планка виконана у вигляді двоплечого шарнірного механізму, по середині довжини якого в центральному отворі жорстко встановлена нерухома вісь з можливістю коливання двоплечого механізму, в корпусі правої рухомої каретки перпендикулярно до штанги виконано центральний отвір, який є у взаємодії з упором, нижній кінець якого має форму щупа лівого двоплечого механізму, крім цього до правого торця правої каретки під'єднано ноніус, хомут зі стопорним гвинтом, механізм точної настройки.

**UA 109876 U**



МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **118403** (13) **U**  
(51) МПК  
**B65G 33/14** (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2017 01002</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>03.02.2017</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.08.2017</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.08.2017, Бюл.№ 15</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Дячун Андрій Євгенович (UA), Клендій Володимир Михайлович (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна (UA), Котик Роман Миколайович (UA), Радик Марія Дмитрівна (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>Дячун Андрій Євгенович, вул. Шептицького, 13, м. Тернопіль, 46000 (UA), Клендій Володимир Михайлович, вул. Тарнавського, 7-а, м. Тернопіль, 46000 (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна, вул. І. Сірка, 10/2, м. Тернопіль, 46000 (UA), Котик Роман Миколайович, вул. Відінська, 35, м. Рівне, 33000 (UA), Радик Марія Дмитрівна, вул. Симоненка, 5/208, м. Тернопіль, 46016 (UA)</b></p>
--	---

**(54) УНІВЕРСАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ ЗАГОТОВОК РІЗНОГО ПРОФІЛЮ**

**(57) Реферат:**

Універсальний пристрій для виготовлення гвинтових заготовок виконаний у вигляді циліндричного кулачка, до торцевої поверхні якого по центру правого торця жорстко закріплена ступінчаста оправка, торцева поверхня якої виконана у вигляді профільного виступу, який виконано у вигляді гвинтової поверхні одного кроку з кроком рівним товщині смуги для навивання гвинтової заготовки, а у більшому ступені виконано осьовий паз, в якому жорстко закріплено кінець смуги. Додатково пристрій оснащений двома механізмами закріплення кінців смуги для навивання коротких і довгих гвинтових заготовок. У більшому ступені оправки виконано осьовий паз, в якому жорстко закріплюють кінець смуги для виготовлення довгих заготовок. Для коротких заготовок пристрій оснащений шпоночною втулкою. Зверху в шліцьовій втулці виконано осьовий паз для встановлення кінця смуги для коротких заготовок. Знизу пристрою під оправкою жорстко встановлено жолоб, який є у взаємодії з навитою гвинтовою заготовкою довгих розмірів. В торці оправки виконано внутрішній шестигранник під ключ для її закручування. Зовнішня поверхня змінних оправок є загартованою і виконаною з конусною поверхнею з кутом 1...1,5 в сторону сходження смуги при навиванні.

UA 118403 U



МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **126986** (13) **U**  
(51) МПК  
**B65G 33/14** (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2018 01624</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>19.02.2018</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.07.2018</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.07.2018, Бюл.№ 13</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Клендій Володимир Миколайович (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна (UA), Клендій Марія Іванівна (UA), Радик Марія Дмитрівна (UA), Котик Роман Михайлович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>Клендій Володимир Миколайович, вул. Тарнавського, 7-а, м. Тернопіль, 46000 (UA), Навроцька Тетяна Дем'янівна, вул. І. Сірка, 10/2, м. Тернопіль, 46020 (UA), Клендій Марія Іванівна, вул. Шашкевича, 18, м. Бережани, Тернопільська обл., 47500 (UA), Радик Марія Дмитрівна, вул. Симоненка, 5/208, м. Тернопіль, 46016 (UA), Котик Роман Михайлович, вул. Відінська, 35, м. Рівне, 33000 (UA)</b></p>
--	--

**(54) СЕКЦІЯ ГНУЧКОГО ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА**

**(57) Реферат:**

Секція гнучкого гвинтового конвеєра виконана з лівої і правої гвинтових секцій однакових діаметрів і довжин однакового гвинтового напрямку, кінці яких жорстко приєднані до фланцевих втулок. Фланцеві втулки своїми кінцями жорстко, з можливістю відносного повертання, з'єднані з П-подібними пружними елементами через радіальні отвори фланцевих втулок, аналогічно перпендикулярно між собою з'єднані з'єднувальні елементи сусідніх секцій з фланцевими втулками. Крім цього сусідні з'єднувальні П-подібні пружні елементи з'єднані між собою профільними скобами з можливістю відносного повертання.

**UA 126986 U**

## ДОДАТОК Б

Комплексний технологічний процес виготовлення ГСРО

ВТУЛКА

ГОСТ 3.1118-82 Форма 1

Дубл.																				
Зам.																				
Підп.																				
																	3	1		
Розроб.	<i>Навроцька</i>			<b>ТНТУ</b>				<b>ГШРО-05.802</b>				46000 50141.XXXXXX								
Нормув.	<i>Навроцька</i>																			
Погодив	<i>Стойко</i>																			
Затв.	<i>Ляиук</i>			<b>Втулка</b>																
Н. контр.	<i>Ткаченко</i>																			
M 01	Труба $\frac{36 \times 4 \text{ ГОСТ } 8732 - 78}{B 20 \text{ ГОСТ } 8731 - 74}$																			
M 02	Код		ОВ	МД	ОН	Н.внтр.	КВМ	Код загот.	Профіль і розміри		КД	МЗ								
			<i>кг</i>	<i>0,088</i>			<i>0,61</i>		<i>Труба L=3000</i>		<i>0,145</i>									
A	Цех	Дільн	PM	Опер.	Код, назва операції			Позначення документу												
B	Код, назва обладнання						CM	Проф	P	УТ	КР	КОВД	ОН	ОП	Кшт.	T <sub>пз</sub>	T <sub>шт.</sub>			
A 01	<b>001 400 Транспортувальна</b>																			
B 02	<i>EK2</i>																			
O 03	<i>1. Транспортувати заготовки на місце механічної обробки</i>																			
T 04	<i>Піддон 3 OCT 23.4.97-81</i>																			
05																				
A 06	<b>005 4112 Автоматна</b>																	28	0,92	
B 07	<i>1A240-4</i>																			
O 08	<i>1. Підрізати торець в розмір (1), точити фаску в розмір (2).</i>																			
P 09	<i>L = 18; i = 1; t = 2; S = 0,1; n = 500; V = 56; T<sub>o</sub> = 0,12.</i>																			
T 10	<i>Різець підрізний відігнутий 16×10×120 T15K10 2112-0084 ГОСТ 18880-73, різець прохідний відігнутий</i>																			
T 11	<i>16×10×120 BK8 лівий 2102-0022 ГОСТ 18877-73, штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89,</i>																			
T 12	<i>патрон цанговий конус 7/24-50 для цанг ER40 DIN 2080 (ГОСТ 25827-93 вик.1) Тип 7616.</i>																			
КТП																				



Дубл.																		
Зам.																		
Підп.																		
																	3	
												<b>ГШРО-05.802</b>			46000 50141.XXXXX			
А	Цех	Дільн	РМ	Опер.	Код, назва операції					Позначення документу								
Б	Код, назва обладнання					СМ	Проф	Р	УТ	КР	КОВД	ОН	ОП	К <sub>шт.</sub>	Т <sub>шт.</sub>	Т <sub>шт.</sub>		
К/М	Назва деталі, ск. одиниці або матеріалу					Позначення, код					ППП	ОВ	ОН	КВ	Н.вигр.			
О 01	2. Повторити перехід 1 три рази.																	
Т 02	Пристрій для фрезерування 4-х пазів, фреза шпонкова спеціальна, калібр на розмір $9,53 \times 2$ І спеціальний,																	
Т 03	калібр на розташування пазів.																	
04																		
А 05	<b>015 4214 Вертикально-свердлильна</b>															20	0,40	
Б 06	2М112																	
О 07	1. Свердлити отвір в розмірі (1), (2).																	
Р 08	$L = 6; i = 1; t = 1,65; S = 0,1; n = 630, V = 6,5; T_o = 0,1, T_d = 0,28.$																	
Т 09	Підставка, патрон 4-В10 ГОСТ 8522-79, свердло $\varnothing 3,3$ 2300-7525 ГОСТ 10902-77.																	
10																		
А 11	<b>020 4107 Різенарізна</b>															20	0,46	
Б 12	2056																	
О 13	1. Нарізати різь в отворі в розмірі (1), (2).																	
Р 14	$L = 10+10; i = 1; t = 1,65; S = 0,7; n = 200, V = 2,5; T_o = 0,15, T_d = 0,28.$																	
О 15	Підставка, патрон різенарізний М3-М12 (6162-43001-01), мітчик 2621-2535.2 ГОСТ 3266-81.																	
16																		
А 17	<b>025 Приймальний контроль</b>																	
КТП																		









Дубл.																					
Зам.																					
Підп.																					

4 4

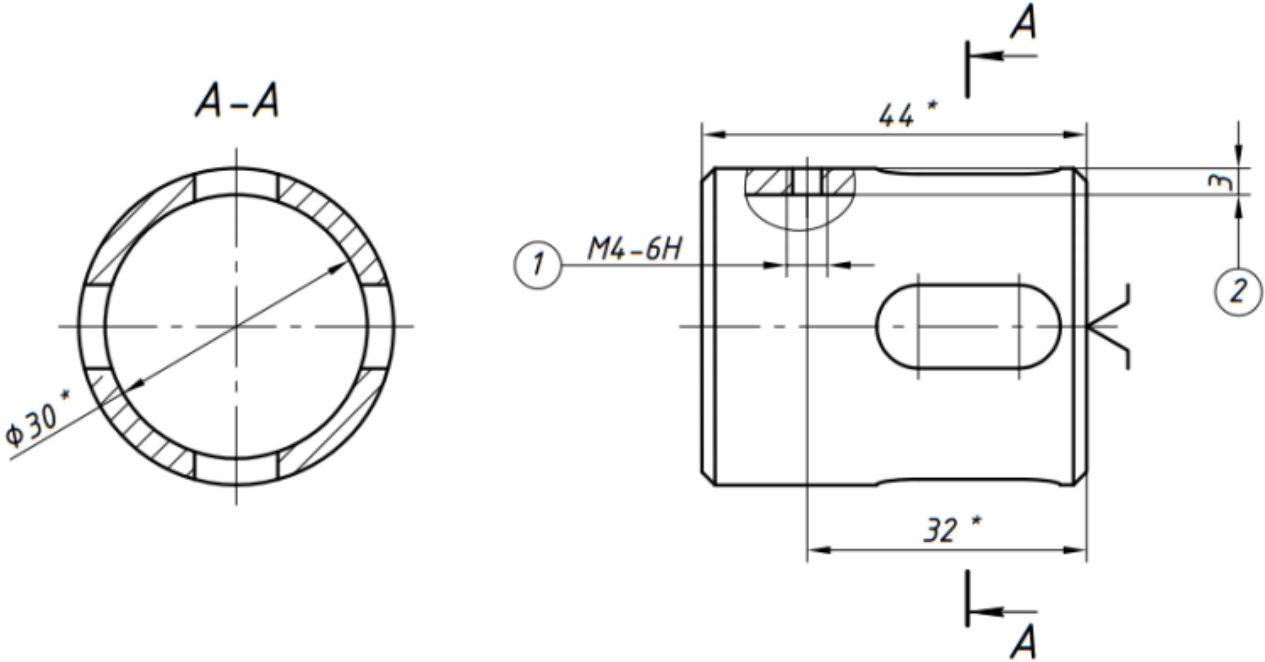
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

*Втулка*

**ГШРО-05.802**

020

$\sqrt{Ra12,5(\sqrt)}$



\* Розміри для довідок

KE







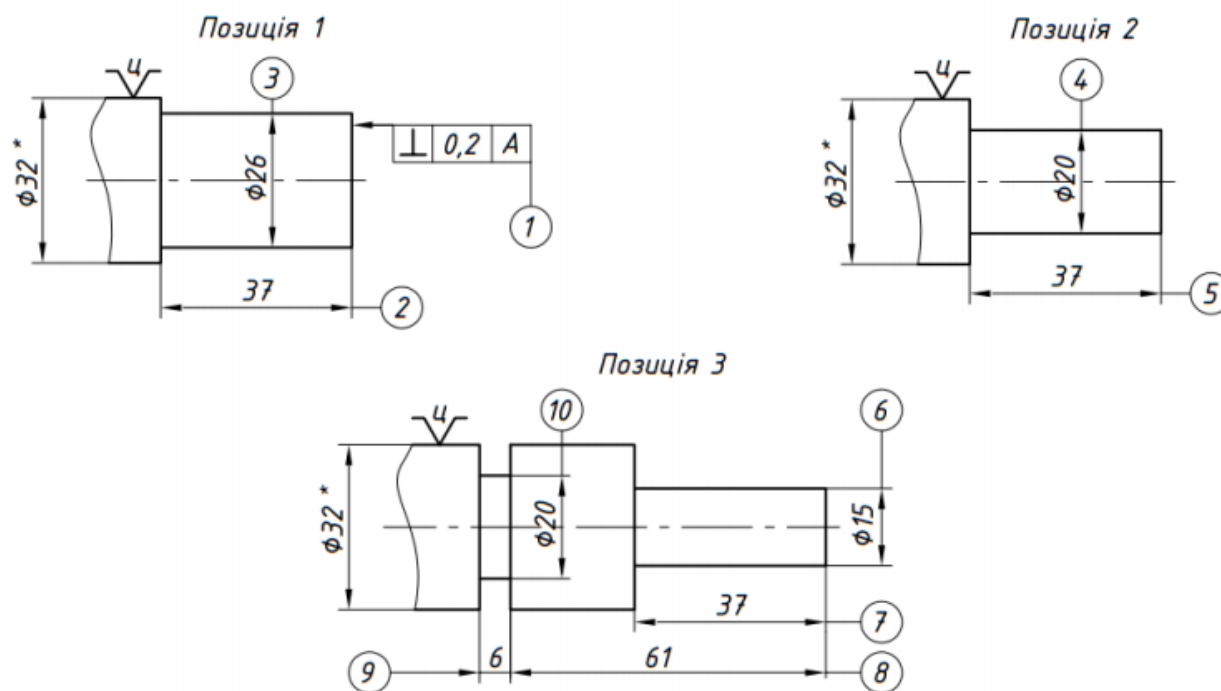




Дубл.									
Зам.									
Підп.									

5 1

Розроб.	Навроцька		ТНТУ	ГШРО-05.601		46000 50141.XXXXX	
Нормув.							
Погодив	Стойко		<b>Палець кульовий</b>				005
Затв.	Ляшук						
Н. контр.	Ткаченко						



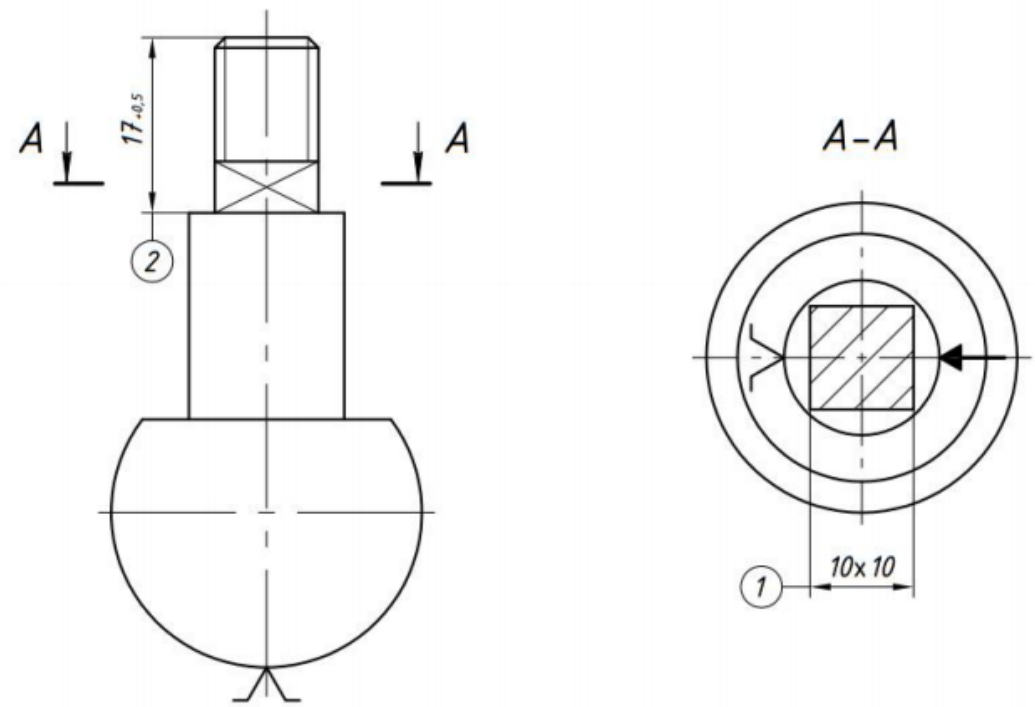
KE



Дубл.																			
Зам.																			
Підп.																			

5 3

														<b>Палець кульовий</b>				<b>ГШРО-05.601</b>		<b>010</b>



KE

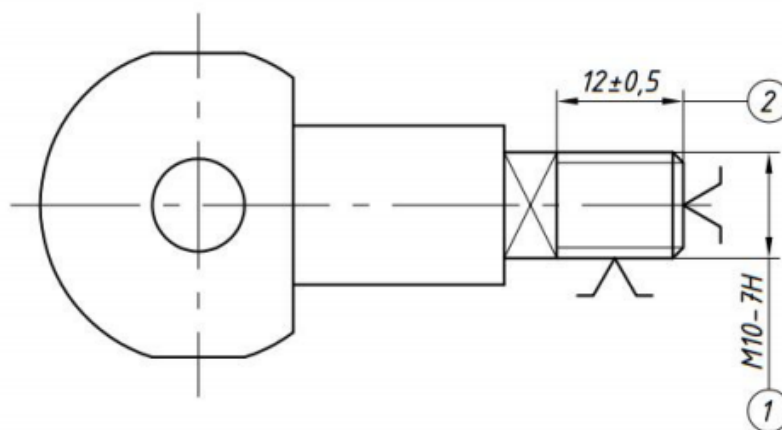


Дубл.																			
Зам.																			
Підп.																			

5 5

*Палець кульовий***ГШРО-05.601**

020

 $\sqrt{Ra12,5 (\sqrt)}$ 

KE

# ЧАШКА

ГОСТ 3.1118-82 Форма 1

Дубл.																				
Зам.																				
Підп.																				
																		4	1	
Розроб.	<i>Навроцька</i>				<b>ТНТУ</b>				<b>ГШРО-05.801</b>				46000							
Нормув.	<i>Навроцька</i>												50141.XXXXXX							
Погодив	<i>Стойко</i>																			
Затв.	<i>Ляшук</i>																			
Н. контр.	<i>Ткаченко</i>								<b>Чашка</b>											
M 01	<i>Труба 42×4 ГОСТ 8732–78 Б 20 ГОСТ 8731–74</i>																			
M 02	Код		ОВ	МД	ОН	Н.вигр.	КВМ	Код загот.	Профіль і розміри	КД	МЗ									
			<i>к2</i>	<i>0,075</i>			<i>0,48</i>		<i>Труба L=3000</i>		<i>0,157</i>									
A	Цех	Дільн	PM	Опер.	Код, назва операції				Позначення документу											
B	Код, назва обладнання							СМ	Проф	P	УТ	КР	КОВД	ОН	ОП	Кшт.	Тпз	Тшт.		
A 01	<b>001 400 Транспортувальна</b>																			
B 02	<i>ЕК2</i>																			
O 03	<i>1. Транспортувати заготовки на місце механічної обробки</i>																			
T 04	<i>Піддон 3 ОСТ 23.4.97-81</i>																			
05																				
A 06	<b>005 4112 Автоматна</b>							28 2,67												
B 07	<i>1Б265-6</i>																			
O 08	<i>1. Підрізати торець в розмір (1).</i>																			
P 09	<i>L = 21; i = 1; t = 2; S = 0,1; n = 400; V = 52; T<sub>o</sub> = 0,15.</i>																			
T 10	<i>Різець підрізний відігнутий 16×10×120 T15K10 2112-0084 ГОСТ 18880-73, патрон цанговий конус 7/24-50 для цанг ER40</i>																			
T 11	<i>DIN 2080 (ГОСТ 25827-93 вик.1) Тип 7616.</i>																			
12																				
КТП																				

Дубл.																				
Зам.																				
Підп.																				
																		2		
																		<b>ГШРО-05.801</b>	46000 50141.XXXXXX	
А	Цех	Дільн	РМ	Опер.	Код, назва операції								Позначення документа							
Б	Код, назва обладнання				СМ	Проф	Р	УТ	КР	КОВД	ОН	ОП	К <sub>шт.</sub>	Т <sub>шт.</sub>	Т <sub>шт.</sub>					
К/М	Назва деталі, ск. одиниці або матеріалу								Позначення, код							ППП	ОВ	ОН	КВ	Н.вигр.
О 01	<i>2. Розточити отвір в розміри (2), (3).</i>																			
Р 02	<i><math>L = 45; i = 1; t = 1; S = 0,1; n = 400; V = 48; T_o = 1,1.</math></i>																			
Т 03	<i>Різець розточний 16×12×120 Т15К6 2140-0056 ГОСТ 18882-73, штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89,</i>																			
Т 04	<i>патрон цанговий конус 7/24-50 для цанг ER40 DIN 2080 (ГОСТ 25827-93 вик.1) Тип 7616.</i>																			
О 05	<i>3. Точити поверхню в розміри (4), (5), і фаску в розмір (6).</i>																			
Р 06	<i><math>L = 45; i = 1; t = 1; S = 0,1; n = 400; V = 50; T_o = 1,1.</math></i>																			
Т 07	<i>Різець прохідний 12×12×120 Т15К6 2102-1102 ГОСТ 18877-73, різець фасковий 25×16×120 ГОСТ 18875-73,</i>																			
Т 08	<i>штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89, патрон цанговий конус 7/24-50 для цанг ER40 DIN 2080</i>																			
Т 09	<i>(ГОСТ 25827-93 вик.1) Тип 7616.</i>																			
О 10	<i>4. Розточити канавку з утворенням фаски в розміри (7), (8), (9).</i>																			
Р 11	<i><math>L = 1; i = 1; t = 1; S = 0,1; n = 400; V = 45; T_o = 0,12.</math></i>																			
Т 12	<i>Різець канавочний розточний 12×12×140 Т15К6 2662-6003 ГОСТ 18885-73, фаскомір спеціальний,</i>																			
Т 13	<i>патрон цанговий конус 7/24-50 для цанг ER40 DIN 2080 (ГОСТ 25827-93 вик.1) Тип 7616.</i>																			
О 14	<i>5. Відрізати деталь в розміри (10), (11).</i>																			
Р 15	<i><math>L = 3; i = 1; t = 3; S = 0,1; n = 400; V = 50; T_o = 0,18.</math></i>																			
Т 16	<i>Різець відрізний пластинчастий 4×18×125 Р6М5 2131-0001 ГОСТ 18884-73, штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89,</i>																			
Т 17	<i>патрон цанговий конус 7/24-50 для цанг ER40 DIN 2080 (ГОСТ 25827-93 вик.1) Тип 7616.</i>																			
КТП																				

















## Результати досліджень

Таблиця В.1

Рандомізована план-матриця експерименту типу ПФЕ 33 при визначенні досліджень крутного моменту навивання з обертовоб втулкою сталь 08кп

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У			Середні значення, У
									повторюваність			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$U_{\text{ср.}}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	58	62	60	60
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	103	100	97	100
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	73	76	74	75
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	97	102	101	100
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	180	182	178	180
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	145	143	147	145
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	152	150	148	150
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	190	210	180	190
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	178	175	172	175
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	330	335	325	330
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	450	430	440	440
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	360	370	365	365
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	420	410	430	420
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	580	575	575	570
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	520	540	530	530
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	425	415	420	420
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	500	505	495	500
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	460	465	455	460
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	210	200	220	210
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	300	280	290	290
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	250	250	250	250
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	300	320	340	320
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	460	460	460	460
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	375	390	385	385
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	300	280	290	290
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	300	380	340	340
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	280	340	310	310

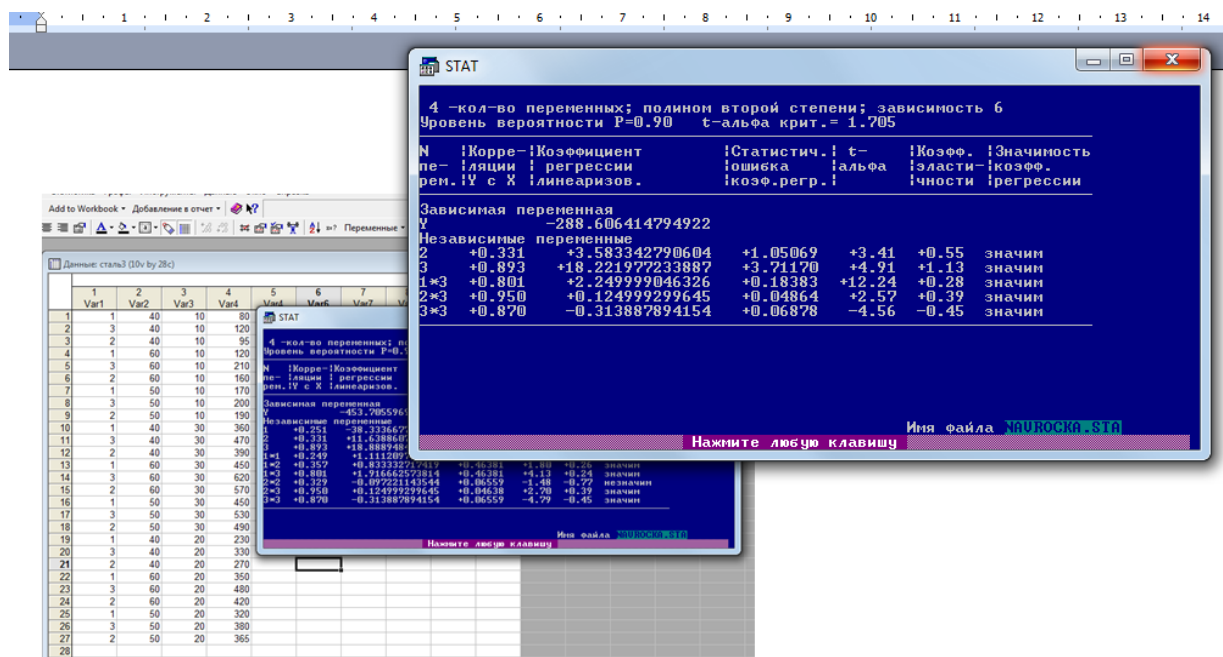
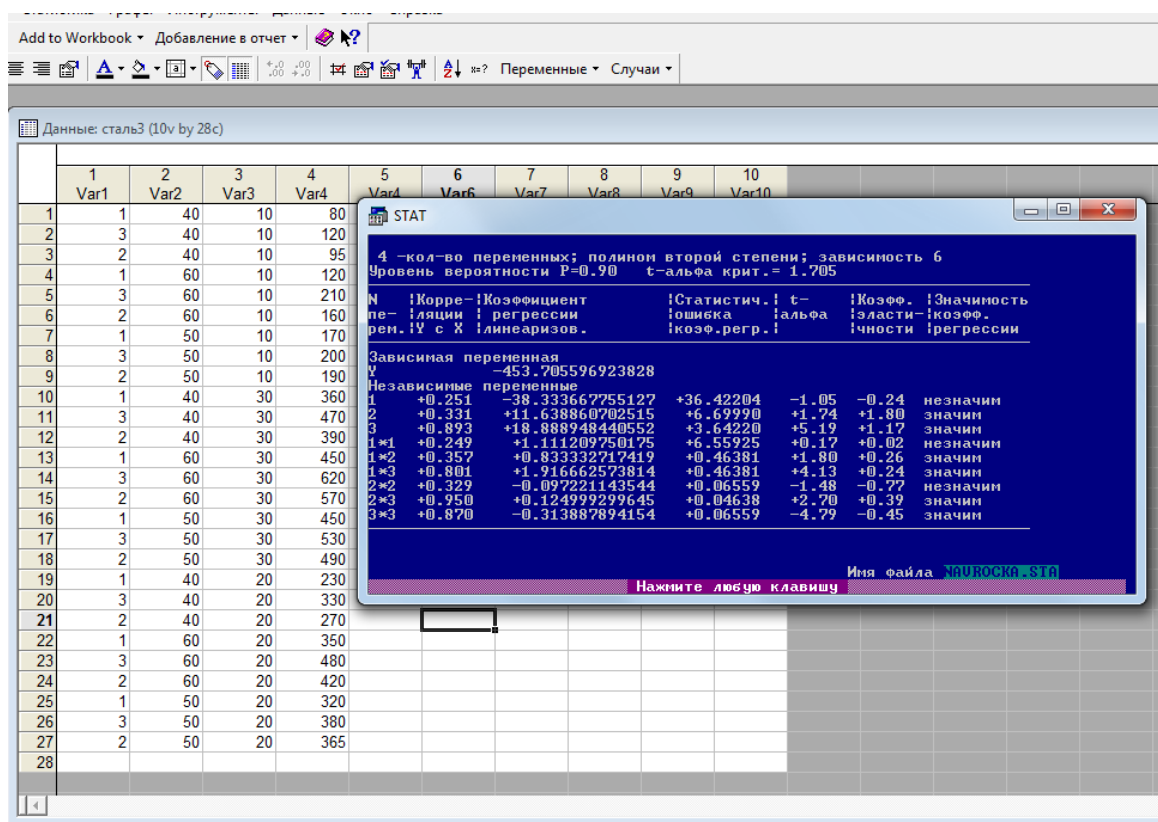
Рандомізована план-матриця експерименту типу ПФЕ 33 при визначенні досліджень крутного моменту навівання з обертю втулкою СтЗ

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У			Середні значення, У
									повторюваність			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$U_{\text{ср.}}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	75	85	80	80
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	130	110	120	120
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	100	95	90	95
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	130	110	120	120
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	210	210	210	210
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	170	150	160	160
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	200	140	170	170
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	200	200	200	200
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	180	200	190	190
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	350	360	370	360
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	480	470	460	470
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	400	380	390	390
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	450	460	440	450
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	600	620	640	620
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	570	570	570	570
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	450	460	440	450
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	535	530	525	530
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	490	500	480	490
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	235	225	230	230
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	300	360	330	330
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	270	270	270	270
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	350	350	350	350
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	500	480	460	480
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	400	440	420	420
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	300	360	330	330
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	380	380	380	380
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	360	370	365	365



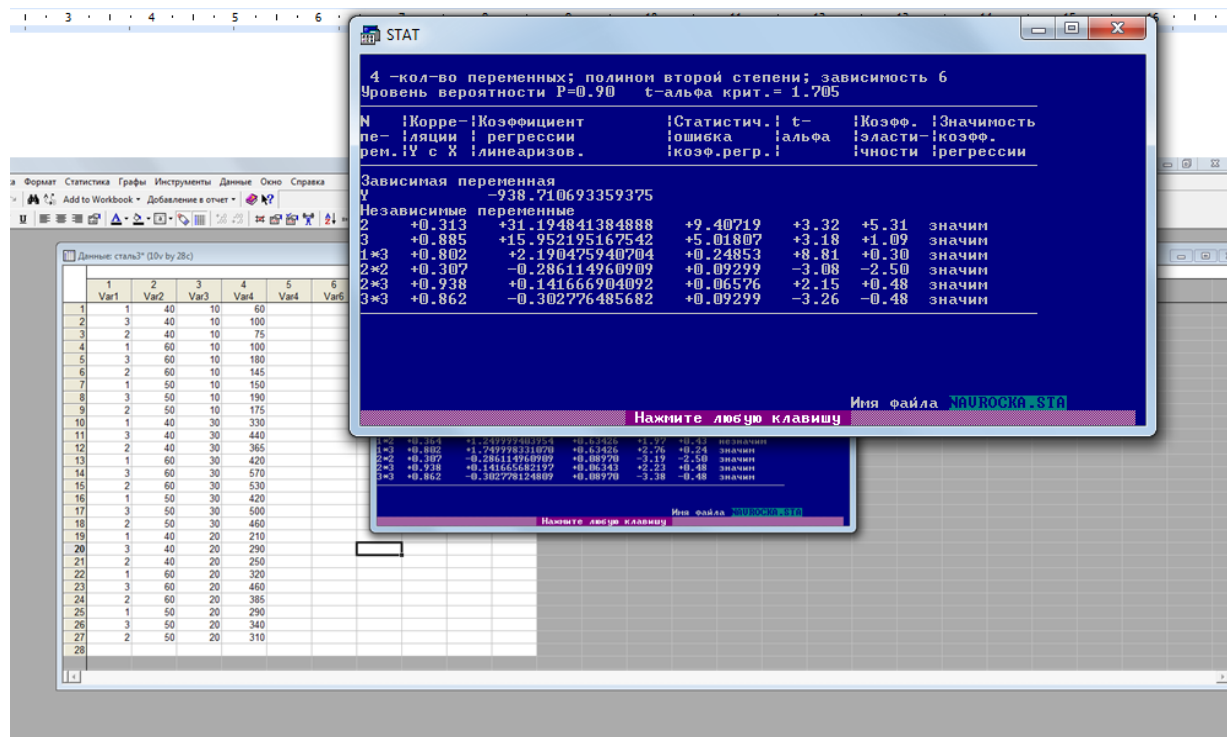
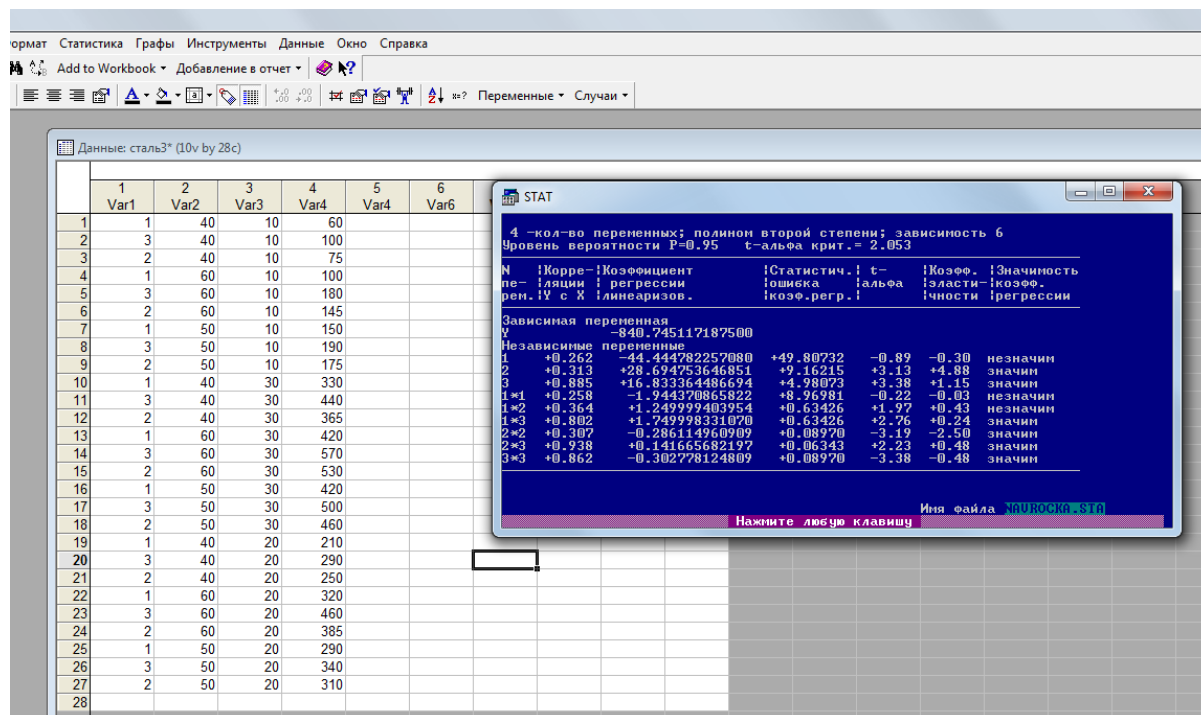
## ДОДАТОК Д

## Результати статистичної обробки експериментальних значень навивання з обертовою втулкою для матеріалу Ст3



## Продовження додатку Д

### Результати статистичної обробки експериментальних значень навивання з обертовою втулкою для матеріалу сталь 08кп



## Продовження додатку Д

### Результати статистичної обробки експериментальних значень зусилля утворення сферично втулки секції робочого органа

STATISTICA - сталь08.sta

Файл Редактирование Просмотр Вставка Формат Статистика Графы Инструменты Данные Окно Справка

Анал 10 B I U

Данные: сталь08.sta (10v by 28c)

	1 Var1	2 Var2	3 Var3	4 Var4	5 Var5	6 Var6	7 Var7	8 Var8	9 Var9	10 Var10
1	1,2	40	20	3,5						
2	1,7	40	20	4,2						
3	1,45	40	20	3,9						
4	1,2	50	20	4						
5	1,7	50	20	4,7						
6	1,45	50	20	4,4						
7	1,2	45	20	3,9						
8	1,7	45	20	4,5						
9	1,45	45	20	4,2						
10	1,2	40	30	4,7						
11	1,7	40	30	5,15						
12	1,45	40	30	4,9						
13	1,2	50	30	5,2						
14	1,7	50	30	6,8						
15	1,45	50	30	6,3						
16	1,2	45	30	5,4						
17	1,7	45	30	6,4						
18	1,45	45	30	5,9						
19	1,2	40	25	4,5						
20	1,7	40	25	5,3						
21	1,45	40	25	5,1						
22	1,2	50	25	5,1						
23	1,7	50	25	6,3						
24	1,45	50	25	5,6						
25	1,2	45	25	5						
26	1,7	45	25	5,6						
27	1,45	45	25	5,3						

STAT

4 - кол-во переменных; полином второй степени; зависимость 6  
Уровень вероятности P=0.90 t-альфа крит. = 1.705

N	Корр- коэф. регрессии	Корр- коэф. регрессии рен. Y с X	Корр- коэф. регрессии рен. Y с X	Статистич. погрешность	t- альфа	Корр- коэф. регрессии	Значимость коэф. регрессии
1	+0.430	-2.257125616074	+3.97556	-0.57	-0.65	незначим	
2	+0.381	+0.328158468008	+0.27161	+1.21	+2.94	незначим	
3	+0.737	+0.534675419331	+0.18106	+2.95	+2.66	значим	
1*1	+0.428	-1.034385396408	+1.15595	-0.89	-0.44	незначим	
1*2	+0.575	+0.116714581847	+0.04087	+2.86	+1.52	значим	
1*3	+0.841	+0.069956593215	+0.04079	+1.71	+0.50	значим	
2*2	+0.377	-0.006567766424	+0.00289	-2.28	-2.67	значим	
2*3	+0.837	+0.006837517023	+0.00284	+3.35	+1.53	значим	
3*3	+0.722	-0.015887184069	+0.00288	-5.51	-2.03	значим	

Зависимая переменная  
Y -11.859504699707

Независимые переменные

Имя файла NAUROCI\_STA

Нажмите любую клавишу

STAT

Таблица анализа дисперсии

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Среднее значение
Регрессия	17.9871	9	1.999
Остаток	0.5298 0	17	0.031
Итого	18.5169	26	

Кoeffициент множественной детерминации D = 0.971  
Кoeffициент множественной корреляции R = 0.986  
Стандартное отклонение оценки s = 0.177  
F критерий Фишера = 64.132  
Кoeffициент D значим с вероятностью P = 1.00000

Имя файла NAUROCI\_STA

Нажмите любую клавишу

## ДОДАТОК Ж

Програма для перевірки параметрів математичної моделі навивання з обертовою втулкою.

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Globalization;
using System.Runtime.Serialization;
using System.Linq;
using Complex = System.Numerics.Complex;
using System.Text;
using MathNet.Numerics.LinearAlgebra;
using MathNet.Numerics.LinearAlgebra.Double;
using MathNet.Numerics.LinearRegression;
using MathNet.Numerics.LinearAlgebra.Factorization;

namespace WindowsFormsApp2
{
    [Serializable]
    public class PolynomialCustom : IFormattable, IEquatable<PolynomialCustom>, ICloneable
    {
        public double[] CoefficientsForCalculation { get; private set; }

        public string VariableNamePattern = "x";

        public int Degree => EvaluateDegreeRange(CoefficientsForCalculation);

        public PolynomialCustom(int n)
        {
            CoefficientsForCalculation = new double[n];
        }

        public PolynomialCustom()
        {
            CoefficientsForCalculation = new double[0];
        }

        public PolynomialCustom(double coefficient)
        {
            CoefficientsForCalculation = new[] { coefficient };
        }

        public PolynomialCustom(params double[] coefficients)
        {
            CoefficientsForCalculation = coefficients;
        }

        public static PolynomialCustom Zero => new PolynomialCustom();

        static int EvaluateDegreeRange(double[] coefficients)
        {

```

```

for (int i = coefficients.Length - 1; i >= 0; i--)
{
    if (coefficients[i] != 0.0)
        return i;
}
return -1;
}

```

#region Evaluation

```

public static double EvaluateValue(double z, params double[] coefficients)
{
    if (coefficients == null)
        throw new ArgumentNullException(nameof(coefficients));
    int n = coefficients.Length;
    if (n == 0)
        return 0;
    double sum = coefficients[n - 1];
    for (int i = n - 2; i >= 0; --i)
    {
        sum *= z;
        sum += coefficients[i];
    }
    return sum;
}

```

```

public static Complex EvaluateValue(Complex z, params double[] coefficients)
{
    if (coefficients == null)
        throw new ArgumentNullException(nameof(coefficients));
    int n = coefficients.Length;
    if (n == 0)
        return 0;
    Complex sum = coefficients[n - 1];
    for (int i = n - 2; i >= 0; --i)
    {
        sum *= z;
        sum += coefficients[i];
    }
    return sum;
}

```

```

public static Complex EvaluateValue(Complex z, params Complex[] coefficients)
{
    if (coefficients == null)
        throw new ArgumentNullException(nameof(coefficients));
    int n = coefficients.Length;
    if (n == 0)
        return 0;
    var sum = coefficients[n - 1];
    for (int i = n - 2; i >= 0; --i)
    {
        sum *= z;

```

```

        sum += coefficients[i];
    }
    return sum;
}
public double EvaluateValue(double z)
{
    return EvaluateValue(z, CoefficientsForCalculation);
}
public Complex EvaluateValue(Complex z)
{
    return EvaluateValue(z, CoefficientsForCalculation);
}

public IEnumerable<double> EvaluateValue(IEnumerable<double> z)
{
    return z.Select(EvaluateValue);
}

public IEnumerable<Complex> EvaluateValue(IEnumerable<Complex> z)
{
    return z.Select(EvaluateValue);
}

public PolynomialCustom Differentiate()
{
    int n = Degree;
    if (n < 0)
        return this;

    if (n == 0)
        return Zero;
    var c = new double[n];
    for (int i = 0; i < c.Length; i++)
        c[i] = CoefficientsForCalculation[i + 1] * (i + 1);
    return new PolynomialCustom(c);
}

public PolynomialCustom Integrate()
{
    int n = Degree;
    if (n < 0)
        return this;
    var c = new double[n + 2];
    for (int i = 1; i < c.Length; i++)
        c[i] = CoefficientsForCalculation[i - 1] / i;
    return new PolynomialCustom(c);
}

public Complex[] Roots()
{
    switch (Degree)
    {
        {
            case -1:

```

```

        case 0:
            return new Complex[0];
        case 1:
            return new[] { new Complex(-CoefficientsForCalculation[0] /
CoefficientsForCalculation[1], 0) };
    }

    var a = EigenvalueMatrix();
    var eigen = a.Evd(Symmetry.Asymmetric);
    return eigen.EigenValues.AsArray();
}

public DenseMatrix EigenvalueMatrix()
{
    int n = Degree;
    if (n < 2)
        return null;
    double aN = CoefficientsForCalculation[n];
    double[] p = new double[n];
    for (int i = n - 1; i >= 0; i--)
        p[i] = -CoefficientsForCalculation[i] / aN;
    var a0 = DenseMatrix.CreateDiagonal(n - 1, n - 1, 1.0);
    var a2 = new DenseMatrix(n);
    a2.SetSubMatrix(1, 0, a0);
    a2.SetRow(0, p.Reverse().ToArray());
    return a2;
}

public static PolynomialCustom Add(PolynomialCustom a, PolynomialCustom b)
{
    var ac = a.CoefficientsForCalculation;
    var bc = b.CoefficientsForCalculation;

    var degree = Math.Max(a.Degree, b.Degree);
    var result = new double[degree + 1];

    var commonLength = Math.Min(Math.Min(ac.Length, bc.Length), result.Length);
    for (int i = 0; i < commonLength; i++)
        result[i] = ac[i] + bc[i];

    int acLength = Math.Min(ac.Length, result.Length);
    for (int i = commonLength; i < acLength; i++)
        result[i] = ac[i];
    int bcLength = Math.Min(bc.Length, result.Length);
    for (int i = commonLength; i < bcLength; i++)
        result[i] = bc[i];

    return new PolynomialCustom(result);
}

/// <summary>
/// Addition of a polynomial and a scalar.
/// </summary>

```

```

public static PolynomialCustom Add(PolynomialCustom a, double b)
{
    var ac = a.CoefficientsForCalculation;

    var degree = Math.Max(a.Degree, 0);
    var result = new double[degree + 1];

    var commonLength = Math.Min(ac.Length, result.Length);
    for (int i = 0; i < commonLength; i++)
    {
        result[i] = ac[i];
    }

    result[0] += b;

    return new PolynomialCustom(result);
}

public static PolynomialCustom Subtract(PolynomialCustom a, PolynomialCustom b)
{
    var ac = a.CoefficientsForCalculation;
    var bc = b.CoefficientsForCalculation;

    var degree = Math.Max(a.Degree, b.Degree);
    var result = new double[degree + 1];

    var commonLength = Math.Min(Math.Min(ac.Length, bc.Length), result.Length);
    for (int i = 0; i < commonLength; i++)
        result[i] = ac[i] - bc[i];
    int acLength = Math.Min(ac.Length, result.Length);
    for (int i = commonLength; i < acLength; i++)
        result[i] = ac[i];
    int bcLength = Math.Min(bc.Length, result.Length);
    for (int i = commonLength; i < bcLength; i++)
        result[i] = -bc[i];
    return new PolynomialCustom(result);
}

public static PolynomialCustom Subtract(PolynomialCustom a, double b)
{
    return Add(a, -b);
}

public static PolynomialCustom Subtract(double b, PolynomialCustom a)
{
    var ac = a.CoefficientsForCalculation;
    var degree = Math.Max(a.Degree, 0);
    var result = new double[degree + 1];
    var commonLength = Math.Min(ac.Length, result.Length);
    for (int i = 0; i < commonLength; i++)
        result[i] = -ac[i];
    result[0] += b;
    return new PolynomialCustom(result);
}

```



```
}

```

```
public static PolynomialCustom Negate(PolynomialCustom a)
{
    var ac = a.CoefficientsForCalculation;
    var degree = a.Degree;
    var result = new double[degree + 1];
    for (int i = 0; i < result.Length; i++)
        result[i] = -ac[i];
    return new PolynomialCustom(result);
}

```

```
public static PolynomialCustom Multiply(PolynomialCustom a, PolynomialCustom b)
{
    if (a == null)
        throw new ArgumentNullException(nameof(a));
    if (b == null)
        throw new ArgumentNullException(nameof(b));
    var ad = a.Degree;
    var bd = b.Degree;
    if (ad < 0 || bd < 0)
        return PolynomialCustom.Zero;
    double[] bc = b.CoefficientsForCalculation;
    double[] ac = a.CoefficientsForCalculation;
    var degree = ad + bd;
    double[] result = new double[degree + 1];
    for (int i = 0; i <= ad; i++)
        for (int j = 0; j <= bd; j++)
            result[i + j] += ac[i] * bc[j];
    return new PolynomialCustom(result);
}

```

```
public static PolynomialCustom Multiply(PolynomialCustom a, double k)
{
    var result = new double[a.Degree + 1];
    var ac = a.CoefficientsForCalculation;
    for (int i = 0; i < result.Length; i++)
        result[i] = ac[i] * k;
    return new PolynomialCustom(result);
}

```

```
public static PolynomialCustom Divide(PolynomialCustom a, double k)
{
    var result = new double[a.Degree + 1];
    var ac = a.CoefficientsForCalculation;
    for (int i = 0; i < result.Length; i++)
        result[i] = ac[i] / k;
    return new PolynomialCustom(result);
}

```

```
public static Tuple<PolynomialCustom, PolynomialCustom>
DivideRemainder(PolynomialCustom a, PolynomialCustom b)
{

```

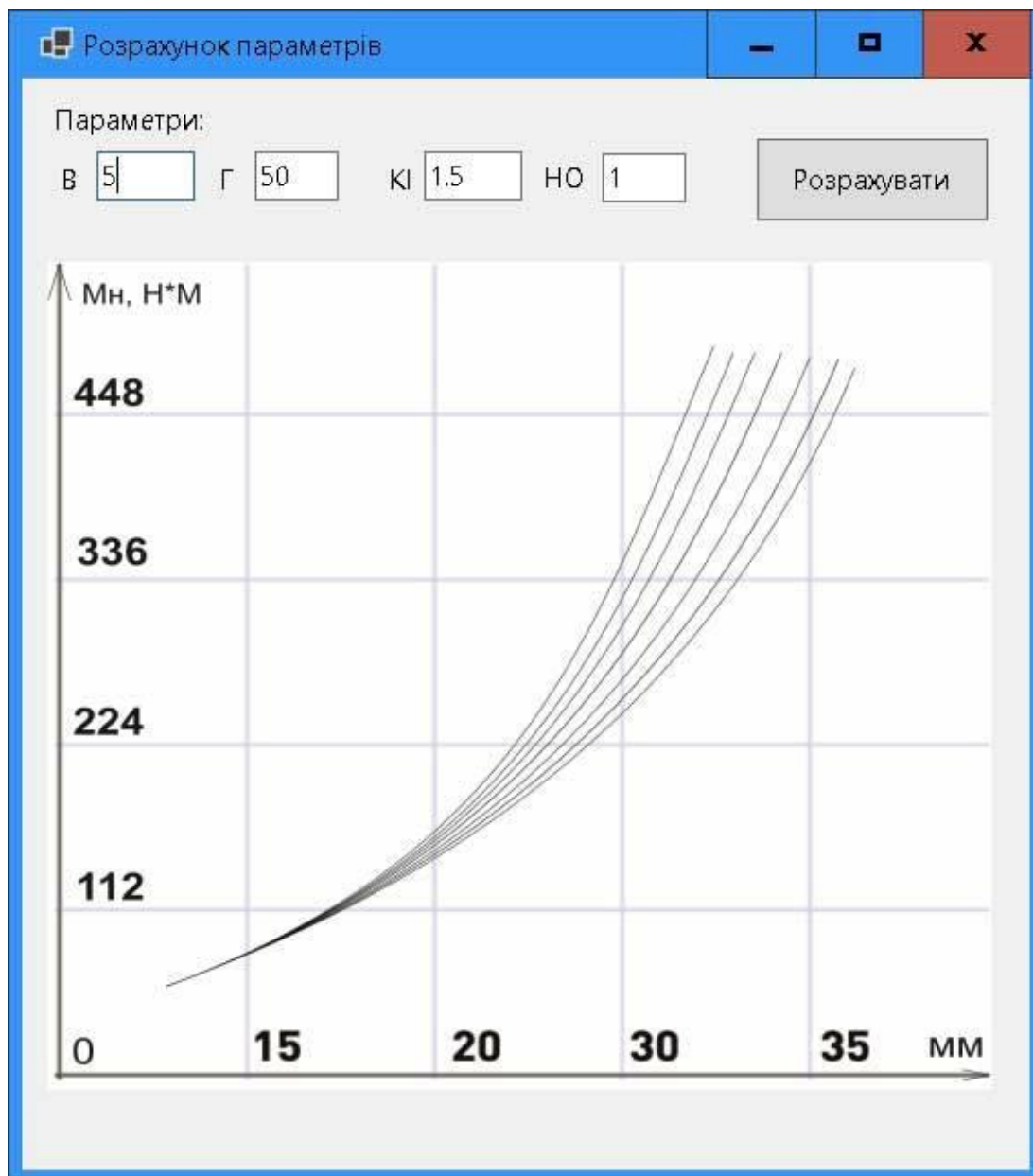
```

var aDegree = a.Degree;
if (aDegree < 0)
    return Tuple.Create(a, a);
var bDegree = b.Degree;
if (bDegree < 0)
    throw new DivideByZeroException("поліном = 0");
if (bDegree == 0)
    return Tuple.Create(Divide(a, b.CoefficientsForCalculation[0]), Zero);
if (aDegree < bDegree)
    return Tuple.Create(Zero, a);
var c2 = b.CoefficientsForCalculation.ToArray();
var scl = c2[bDegree];
var c1 = a.CoefficientsForCalculation.ToArray();
var c22 = new double[bDegree];
for (int ii = 0; ii < c22.Length; ii++)
    c22[ii] = c2[ii] / scl;

int i = aDegree - bDegree;
int j = aDegree;
while (i >= 0)
{
    var v = c1[j];
    for (int k = i; k < j; k++)
        c1[k] -= c22[k - i] * v;
    j--;
    i--;
}
var l1 = aDegree - j;
var quo = new double[l1];
var j1 = j + 1;
for (int k = 0; k < l1; k++)
    quo[k] = c1[k + j1] / scl;

var rem = new double[j1];
for (int k = 0; k < j1; k++)
    rem[k] = c1[k];
return Tuple.Create(new PolynomialCustom(quo), new PolynomialCustom(rem));
}

```



## ДОДАТОК 3

## Акти впровадження результатів дослідження

ТОВАРИСТВО З  
ДОДАТКОВОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
"БУЛАТ"



PUBLIC  
JOINT STOCK COMPANY  
"BULAT"

Юридична адреса:  
48120, Україна, Тернопільська обл., смт Микулинці,  
вул. Тернопільська, 35  
Тел. +380-355-151-145,  
Тел/факс +380-355-151-300  
<http://www.bulat.te.ua>

Address:  
48120, 35 Ternopil'ska St., Mykulyncy, Ternopil, Ukraine  
Tel. +380 355 151-145  
Fax. +380-355-151-300  
<http://www.bulat.te.ua>

№ 53

15 лютого 2020 р.

За місцем вимоги,

**АКТ**  
**Впровадження наукової розробки на ТДВ «Булат»**

Даний акт складено про те, що за результатами наукової розробки, проведеної в Тернопільському національному технічному університеті імені І. Пулюя з виготовлення експериментального зразка гвинтового шарнірно-секційного робочого органа згідно деклараційного патенту України № 123628 авторів Ляшук О. Л.; Клендій В. М.; Навроцька Т.Д.; Маруніч О. П. Розроблена та реалізована розробка забезпечує підвищення продуктивності технологічного процесу формування гвинтових елементів на крок.

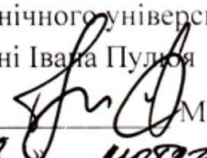
Директор



Ковальчук О.В.

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи  
Тернопільського національного  
технічного університету  
імені Івана Пулюя

  
Марущак П. О.  
« 8 листопада » 2021 р.



  
Митник М. М.  
« 10 листопада » 2021 р.

## АКТ

Ми, які нижче підписалися, представники Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: начальник навчального відділу Ткаченко І. Г., завідувач кафедрою інжинірингу машинобудівних технологій (МТ) доцент Окіпний І. Б. доцент кафедри МТ Дячун А. Є. склали цей акт про те, що в освітньому процесі здобувачів вищої освіти за спеціальністю 131 Прикладна механіка використовуються результати наукових досліджень Навроцької Тетяни Дем'янівни, отримані за результатами виконання дисертаційної роботи на тему «Технологічне забезпечення виготовлення гвинтових секційних робочих органів машин».

Матеріали наукових досліджень Навроцької Т. Д. використовуються при викладанні дисциплін «Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин», «Технологія обробки типових деталей та складання машин» «Технології та устаткування машинобудівних виробництв».

Голова комісії:

начальник навчального відділу



І. Г. Ткаченко

Члени комісії:

завідувач кафедрою МТ



І. Б. Окіпний

доцент кафедри МТ



А. Є. Дячун