

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Дзюра Володимир Олексійович

УДК 621.01+621.9.015+621.787.4+621.715.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ
РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ОБЕРТАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ**

05.02.08 – Технології машинобудування

технічні науки

**Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

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

Науковий консультант
Марущак Павло Орестович
доктор технічних наук,
професор

Тернопіль – 2021

АНОТАЦІЯ

Дзюра В.О. Наукові основи забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей машин у вигляді тіл обертання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішено актуальну для технології машинобудування науково-прикладну проблему комплексного забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» з урахуванням умов експлуатації шляхом оптимізації структури технологічних процесів за параметрами якості та забезпеченні прогресивних режимів обробки з допомогою статистичних методів оцінювання. При цьому фізико-механічні параметри якості, які забезпечують експлуатаційні властивості поверхонь, запропоновано забезпечувати операціями ППД із формуванням регулярних мікрорельєфів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в отриманні нових експериментальних і теоретичних методів розрахунку параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» з урахуванням комплексного підходу та умов експлуатації.

Основний зміст дисертаційної роботи складається з шести розділів.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел проаналізовано технологічні методи та засоби забезпечення якісних параметрів поверхонь деталей машин класу «тіла обертання». Проаналізовано результати досліджень у напрямі формування якісних параметрів поверхонь деталей машин. Розглянуто методи формування регулярного мікрорельєфу на поверхнях деталей класу «тіла обертання» деталей машин. Проаналізовано технічні вимоги до об'єктів досліджень. Встановлені недоліки існуючих технологічних

процесів, які не забезпечують заданих експлуатаційних властивостей сформованих поверхонь.

У другому розділі описано методологію проведення досліджень формування якісних параметрів циліндричних поверхонь деталей машин класу «тіла обертання». Для цього розглянуто технологічну спадковість і точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь об'єкту дослідження. Проаналізовано та оптимізовано технологічний процес формування внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра на основі аналізу топографії її мікрорельєфу, утвореного на різних технологічних операціях. Розроблено ймовірно-статистичний метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні, сформованої точінням та ймовірно-статистичний метод оцінювання впливу кривини на шорсткість поверхні, сформованої токарною обробкою. Також розроблено спосіб аналітичного описування профілю поверхні, який дозволяє описати профіль шорсткості поверхні у вигляді математичної моделі.

У третьому розділі розроблено математичну модель динамічного процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні деталі. Особливістю є те, що процес формування відбувається зосередженою силою, точка прикладання якої стосовно деталі змінюється в радіальному та осьовому напрямках. Запропоновано таку дію моделювати за допомогою дельта функцій Дірака за лінійною та часовою змінними, використовуючи метод регуляризації вказаних особливостей, а відтак існуючі методи інтегрування відповідних нелінійних математичних моделей поздовжніх та поперечних коливань деталі, отримано аналітичні співвідношення які описують профіль мікрорельєфу.

У четвертому розділі класифіковано частково регулярні мікрорельєфи, сформовані на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» у вигляді ієрархічної системи: клас – ознаки класифікації – підознаки – характеристики цих підознак, яка структурована на основі кінематики технологічного процесу формування ЧРМ. Ознаками класифікації запропоновано прийняти: способи

формування ЧРМ; форму осьової лінії НРМ; взаємне розташування суміжних канавок; взаємне розміщення осьових ліній НРМ; форми канавок.

Проведено моделювання частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» за допомогою блокового принципу, за яким кожна ознаку канавок мікрорельєфу описують системою окремих математичних залежностей, а для генерування будь-якого ЧРМ із множини можливих варіантів ці математичні залежності поєднують між собою. Наведено схему утворення множини варіантів канавок ЧРМ, що сформовані на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання». Отримано аналітичні залежності для визначення площі канавок трикутної форми частково регулярного мікрорельєфу, сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання». Проведено визначення оптимальних параметрів канавок частково регулярного мікрорельєфу I і II типу, сформованого на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання». Виведено залежності та області їх існування для визначення площі перекриття канавок ЧРМ III типу.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень процесу формування частково регулярних мікрорельєфів на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання». При цьому описано використане обладнання, спеціальний інструмент і програмне забезпечення для розрахунку координат опорних точок мікрорельєфу, обґрунтовано форму та розміри дослідного зразка. Описаний процес підготовки поверхні дослідного зразка до проведення повнофакторного експерименту, зокрема поділ зразка на сектори та зони. Розроблено програму і методику проведення експериментальних досліджень, при цьому вибрано та обґрунтовано досліджувані параметри та рівні їх варіювання. Отримані експериментальні дані перевірені на однорідність за критерієм Гребса та статистично опрацьовано. На основі результатів повнофакторного експерименту встановлено вплив зусилля деформування, швидкості подачі та осьового кроку канавок на середнє значення ширини канавки сформованого частково регулярного мікрорельєфу, сформованого на

торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання». Отримано регресійні залежності, поверхні відгуку та двомірні їх перерізи, які описують вплив цих параметрів на ширину канавки в межах, встановлених при проведенні експерименту, рівнів варіювання змінних факторів.

У шостому розділі розроблено конструкцію та методику розрахунку основних конструктивних параметрів дворіцевої адаптивної розточувальної головки. Розроблено конструкцію інструменту для формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях довгомірних циліндричних заготовок вібраційним обкочуванням та методику розрахунку основних конструктивних параметрів інструмента. Також визначено вплив розміщення деформувальних елементів на параметри регулярного мікрорельєфу. Розроблено кінематичну схему токарного верстата із жорстко зв'язаним кінематичним зв'язком для формування регулярних мікрорельєфів на довгомірних циліндричних поверхнях. Розроблено спосіб вимірювання шорсткості відповідальних циліндричних поверхонь, отриманих методами протягування та прошивання.

Ключові слова: параметри якості, фізико-механічні властивості, математичне моделювання, регулярні мікрорельєфи, шорсткість поверхні, режими обробки, поверхні деталі класу «тіла обертання», класифікація, точність форми, канавки.

ABSTRACT

Dzyura V.O. Scientific foundations of quality parameters assurance of bodies-of-rotation-type machine parts working surfaces. – Qualification scientific paper as a manuscript copyright.

Doctor of Technical Sciences thesis on specialism 05.02.08 – «Mechanical Engineering» (Technical Sciences). – Ternopil I.Puluj National Technical University of MES of Ukraine, Ternopil, 2021.

A very important mechanical engineering scientific-applied problem of complex assurance of the quality parameters of bodies-of-rotation-type machine parts working surfaces has been solved in the thesis under discussion on the basis of the obtained new scientifically substantiated results taking into account the operating conditions due to the technological processes structure optimization by the quality parameters and the machining progressive modes assurance by means of statistical methods of assessment. Therefore, the physical-mechanical parameters of quality providing the surface performance characteristics have been proposed to achieve by means of SPD (surface plastic deformation) operations with regular microreliefs formation.

The scientific novelty of the obtained results has involved the development of new experimental and theoretical methods of calculating the quality parameters of bodies-of-rotation-type machine parts working surfaces taking into account some complex approach and operating conditions.

The main contents of the thesis consists of six chapters.

In Chapter I the analysis of technological methods and facilities providing the high-quality parameters of the surfaces of machine parts of “bodies of rotation” type has been made on the basis of literature sources review. The results of the research have been analysed aimed at formation of high-quality parameters of the machine parts surfaces. Some methods of regular microrelief formation on the surfaces of bodies of rotation of machine parts have been taken into consideration.

The technical requirements to the objects of investigation have been analysed.

In Chapter II the procedure of conducting the study of high-quality parameters formation of bodies-of-rotation-type machine parts cylindric surfaces has been described. For this purpose the technological heredity and the shape accuracy of cylindric surfaces cross sections of the object of investigation has been taken into consideration. The analysis and optimization of the technological process of internal cylindric surface formation of a hydraulic cylinder barrel have been made based on the analysis of topography and microrelief formed in different technological operations. The probabilistic-statistical method of feeding impact assessment on the surface roughness formed by turning and the probabilistic-statistical method of flexure impact assessment on the surface roughness formed by turning have been developed. Moreover, the technique of analytical description of the surface contour has been developed which made possible to describe the surface roughness in the form of a mathematical model.

In Chapter III the investigation has been carried out and some mathematical model of dynamic process of regular microrelief formation on the machine part internal cylindric surface has been developed. The peculiarity of the study under discussion is that the formation process is taking place under concentrated (point) force conditions whose point of application varies in radial and axial directions relative to the workpiece. The action under study has been proposed to be simulated by means of linear and time variables of Dirac delta functions using both the method of the above mentioned features regularization and the conventional methods of integrating the appropriate nonlinear mathematical models of longitudinal and lateral vibrations of the part as well. Some analytical dependencies describing the microrelief profile have been obtained.

In Chapter IV the partially regular microreliefs (PRM) formed on the end surfaces of the bodies of rotation have been classified in the form of a multistage system: class – classification criteria – subcriterion – characteristics of these subcriteria structured on the basis of kinematics of the technological process of the partially regular microreliefs (PRM) formation. The following classification criteria

have been proposed to be accepted: ways of PRM formation; form of CRM (continuous regular microroughness) center line; relative position of adjacent grooves; relative position of CRM center lines; forms of grooves.

Some partially regular microreliefs formed on the end surfaces of bodies of rotation have been simulated by means of block principle where each characteristic feature of the microrelief groove is described by the system of separate mathematical dependencies. In this case these mathematical dependencies should be combined for any PRM generating from the variety of possible options. The scheme of generating of possible options variety of PRM grooves formed on the end surfaces of bodies of rotation has been given. The analytical dependencies to find the area of grooves of triangular shape of the partially regular microrelief formed on the end surfaces of bodies of rotation have been obtained. The optimal parameters of the grooves of partially regular microrelief of I and II type formed on the end surfaces of bodies of rotation have been determined. The dependencies and the range of their existence to find the grooves overlapped area of the PRM of III type have been derived.

In Chapter V the results of experimental studies of partially regular microrelief formation on the end surfaces of bodies of rotation have been given. In this connection the equipment used, special tools and software to calculate the target points coordinates of the microrelief have been described, the shape and size of the test sample have been substantiated. The process of the test sample surface preparation for the full factorial experiment carrying out, namely the sample division into sectors and areas, has been described. The program and the technique of the experimental research have been developed. Moreover, the parameters under study and the levels of their variation have been chosen and substantiated. The obtained experimental data have been checked for their homogeneity by Grubbs' test and have been processed statistically. The impact of deformation effort, feeding speed and the groove axial pitch on the average value of the groove width of the formed partially regular microrelief formed on the end surface of the body of rotation has been determined on the basis of the results of the full factorial experiment. Some regression dependencies, response surfaces and their two-dimensional cross sections

have been obtained which describe the influence of these parameters on the groove width within the boundaries of variable factors levels of variation determined by the conducted experiment.

In Chapter VI the design and calculation procedure of main design parameters of a twin-cutter adaptive boring head have been developed. The design of the tool for regular microrelief formation on internal cylindrical surfaces of some long cylindrical workpieces by vibration burnishing and the calculation procedure of main design parameters of the tool have been developed. Besides, the impact of deforming elements location on the regular microrelief parameters has been determined. A kinematic scheme of a lathe with rigid kinematic connection for regular microreliefs formation on long cylindrical surfaces has been developed. A measurement method of roughness of essential cylindrical surfaces obtained by broaching and sewing methods has been developed.

Key words: quality parameters, physical-mechanical properties, mathematical modeling, regular microrelief, surface roughness, modes of treatment, surfaces of bodies of rotation, classification, shape accuracy, grooves.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Публікації, які відображають основні наукові результати дисертації

1. Dzyura V.O., Kryvyi P.D., Tymoshenko N.M., Krupa V.V. Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces. Volume 2: Processing, Detroit, Michigan, USA, June 9–13, 2014, ISBN: 978-0-7918-4581-3. DOI: 10.1115/MSEC2014-3946 (**Scopus**). (автором запропоновано методика визначення впливу технологічної спадковості).

2. Dzyura V.O., Maruschak P.O., Zakiev I.M., Sorochak A.P. Analysis of Inner Surface Roughness Parameters of Load-carrying and Support Elements of Mechanical Systems. *IJE TRANSACTIONS B: Applications* Vol. 30, No. 8, (August 2017) 1170-1175 (**Scopus Q2**). (автором визначено точність форми поперечних перерізів гільз циліндрів гідроциліндрів).

3. Dzyura V., Kryvyi P., Tymoshenko N., Maruschak P., Nugaras J., Prentkovskis O. Probability-statistical estimation method of feed influence on as-turned finish of steels and non-ferrous metals. *Metals* 2018, 8, 965. DOI: 10.3390/met8110965 (**Scopus Q2**). (автором запропонована методика визначення впливу стохастичності подачі та проведені експериментальні дослідження).

4. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Dykha A., Zamota T., & Dzyura V. (2019). Exploring a possibility to control the stressedstrained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (99)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171619> (**Scopus Q2**). (автором проведено моделювання процесу у віртуальному середовищі).

5. Dzyura Volodymyr, Kryvyi Petro, Maruschak Pavlo, Panin Sergey, Lyashuk Oleh, Vlasov, Ilya. Influence of Curvature and Cross-sectional Shape of Cylindrical Surface Formed by Turning on Its Roughness. - *Arabian Journal for Science and Engineering*. - 2020/04/10. 2191-4281. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04512-8> (**Scopus Q2**). (автором запропонована методика та проведені експериментальні дослідження).

6. Hutsaylyuk V., Lytvynenko I., Maruschak P., Dzyura V., Schnell G., Seitz H. A New Method for Modeling the Cyclic Structure of the Surface Microrelief of Titanium Alloy Ti6Al4V After Processing with Femtosecond Pulses. *Materials*. 2020; 13(21):4983. <https://doi.org/10.3390/ma13214983> (**Scopus Q2**). (автором здійснено розрахунок значень параметрів).

7. Maruschak P., Dzyura V., Prentkovskis O., Lytvynenko I., Polutrenko M. Microdefects of Biocorroded Pipe Steel Surfaces and Safety Assessment of Localized Stress Concentrators. *Metals* 2020, 10, 852. <https://doi.org/10.3390/met10070852> (**Scopus Q2**). (автором запропоновано вплив середовища на висотні параметри шорсткості циліндричної поверхні)

8. V. Dzyura, P. Maruschak, H. Kozbur, P. Kryvyi, and O. Prentkovskis, “Determining optimal parameters of grooves of partially regular microrelief formed on end faces of rotary bodies” *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, Vol. 5, No. 1 (2021): 18–29. <https://doi.org/10.1520/SSMS20200057> (**Scopus Q2**). (Автором запропоновано методику забезпечення оптимальних параметрів та виведено аналітичні залежності).

9. Dzyura V., Maruschak P., Prentkovskis O. Determining Optimal Parameters of Regular Microrelief Formed on the End Surfaces of Rotary Bodies. *Algorithms* 2021, 14, 46. <https://doi.org/10.3390/a14020046> (**Scopus Q2**). (автором встановлено стадіювання процесу перетину та отримано залежності для визначення умов їх існування).

10. Dzyura V., Maruschak P. Optimizing the formation of hydraulic cylinder surfaces, taking into account their microrelief topography analyzed during different operations. *Machines* 2021, 9, 116. <https://doi.org/10.3390/machines9060116> (**Scopus Q2**). (автором досліджено параметри якості поверхні і встановлено їх взаємозв'язок із експлуатаційними властивостями).

11. Дзюра В.О. Динамічна модель процесу проточування зовнішніх гвинтових канавок / Дзюра В.О., Палюх А. // Вісник ТДТУ. – 2010. – Том 15. – № 1. – С. 157-162. – (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки). (Фахове видання України). (автором розроблено

динамічну модель роботи інструменту).

12. А.А. Ткачук, В.Ю. Заблоцький, Дзюра В.О. Підвищення зносостійкості фрикційних поверхонь обертання методами поверхневого пластичного деформування. Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – №5 (2). - с. 158-163. (Фахове видання України). *(автором запропоновано методи ППД для підвищення зносостійкості поверхні).*

13. Дзюра В.О., Кривий П.Д. Instrument for inner cylinder surfaces vibrating rolling and its structural parameters determination technique. Scientific journal of the TNTU, No 2 (82) 2016 p.70-81. (Фахове видання України). *(автором отримано аналітичні залежності для розрахунку конструктивних параметрів інструменту).*

14. Дзюра В.О. Кривий П.Д. Прогресивна дворіцева адаптивна розточувальна головка. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2016. – № 3 (78) (2016) – с. 20-27. (Фахове видання України). *(автором отримано аналітичні залежності для розрахунку конструктивних параметрів інструменту).*

15. Дзюра В.О. Вплив розміщення деформувальних елементів на параметри регулярного мікрорельєфу. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями технічних наук) Луцьк, 2017. Випуск 60. – с. 100-112. (Фахове видання України)

16. Дзюра В.О. Визначення площі канавок трикутної форми частково регулярного мікрорельєфу, сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання / В. О. Дзюра // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2020. - № 2. - С. 62-67. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2020_2_10. DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-62-67 (Фахове видання України).

17. Дзюра В.О. Класифікація частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання. / В.О. Дзюра // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. - 2020. - Вип. 3(34). -

C.129-135. (Фахове видання України).

18. Марущак П.О., Литвиненко Я.В., Дзюра В.О., Біщак Р.Т., Полутренко М. С. Виявлення мікродефектів на поверхні кородованої сталеві труби. - С. 103-111. (Фахове видання України). *(автором проаналізовані поверхневі мікродефекти циліндричних поверхонь)*.

19. Dzyura V. Modeling of partially regular microreliefs formed on the end faces of rotation bodies by a vibration method. UJMEMS. 2020; Volume 6, Number 1: 30-38. (Фахове видання України).

20. Dzyura V. Dynamics of regular microrelief formation on internal cylindrical surfaces. Scientific journal of the TNTU, No 1 (101) 2021 p.115-128. (Фахове видання України).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

21. Кривий П., Дзюра В., Апостол Ю. Математичні моделі регулярних мікрорельєсів сформованих на зовнішніх поверхнях одночасно осцилюючими віброобкатниками. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, (м. Тернопіль, 19-20 грудня 2012 року) Тернопіль: ТНТУ, 2012. С. 90-91.

22. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Кашуба Н.П. Інструментальна головка для оброблення деталей поверхневим пластичним деформуванням. XII всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Київ, 2012) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Націон. ун-тет. України "КПІ" [та ін]. – Київ: КПІ, 2012. С.62-65.

23. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Кашуба Н.П. Імовірнісний підхід при визначенні відносної площі віброобробочування плоских поверхонь. Збірник праць Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів. м. Тернопіль 11-12 грудня 2013 р. – Тернопіль: ТНТУ, 2013. С. 104.

24. Кривий П.Д., Крупа В.В., Дзюра В.О. Пристрій для вимірювання

силових характеристик процесу різання при обробленні внутрішніх циліндричних поверхонь. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11–12 грудн. 2013.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль: ТНТУ, 2013. С.102-103.

25. Швець А.М., Ткаченко І.Г., Дзюра В.О. Інструмент для обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь кульками. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 28–29 листопада 2018.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. С.174-175.

26. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Кривінський П.П. Ймовірно-статистичний метод оцінювання відхилення від круглості на основі гармонічного аналізу і теорії малої вибірки. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. 5-та Міжнародна науково-практична конференція, 01-03 жовтня 2014 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2014. С. 210-214.

27. П.Д. Кривий, В.О. Дзюра, В.В. Крупа, Н.М. Тимошенко, Т.С. Дубиняк. Визначення впливу подачі на шорсткість поверхні обробленої різанням. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (м. Тернопіль, 19-20 листопада 2014 року) Тернопіль: ТНТУ, 2014. С. 91-93.

28. Грицай І.Є., Кривий П.Д., Дзюра В.О., Яцюк В.А. Ймовірнісний метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні, отриманої в процесі різання пластичних сплавів. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «прогресивні технології в машинобудуванні», (м. Львів, 2-6 лютого 2015 року) Львів: Львівська політехніка, 2015. С. 35-37.

29. Кривий П., Дзюра В., Тимошенко Н. Прогресивна технологія формування регулярних мікрорельєфів на довгомірних циліндричних поверхнях. Дванадцятий Міжнародний симпозіум українських інженерів-

механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. С. 85-86.

30. Кривий П., Крупа В., Дзюра В., Кушпіль В. Модернізація токарного верстата для оброблення отворів довгомірних циліндрів. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 55-річчю заснування ТНТУ та 170- річчю з дня народження І. Пулюя «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», (м. Тернопіль, 19-20 травня 2015 року) Тернопіль: ТНТУ, 2015. С. 95-96.

31. Кривий П., Дзюра В., Тимошенко Н., Апостол Ю. Статистичне оцінювання відхилень від круглості на основі гармонічного аналізу і теорії малої вибірки. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 55-річчю заснування ТНТУ та 170- річчю з дня народження І. Пулюя «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», (м. Тернопіль, 19-20 травня 2015 року) Тернопіль: ТНТУ, 2015. С. 97-98.

32. П.Д. Кривий, В.О. Дзюра. Підвищення якості гільз гідроциліндрів автомобільних кранів КТА-25. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції "Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів", (м. Одеса, 8-11 вересня 2015 року). – Одеса: Військова академія, 2015. С. 123.

33. П.Д. Кривий., В.О. Дзюра, Н.М. Тимшенко. Статистичне оцінювання відхилень від круглості поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь згортних втулок приводних роликів ланцюгів. XV Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція "Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї-наука- виробництво", (Житомир, 04–07 листопада. 2015.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Житом. держ. техн. ун-т [та ін]. – Житомир: ЖДТУ, 2015. С. 50-53.

34. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Кривінський П.П. Метод визначення впливу кривизни обробленої поверхні сформованої обточуванням та розточуванням на її шорсткість. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (м. Тернопіль, 25-26 листопада 2015 року) – Тернопіль:

ТНТУ, 2015. С. 135-136.

35. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Кривінський П.П. Міцність пресових з'єднань втулка-отвір внутрішньої пластини приводних роликів і втулкових ланцюгів закордонних фірм на основі теорії малої вибірки. Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», (м. Львів, 8-12 лютого 2016 року) Львів: Львівська політехніка, 2016. С. 52-55.

36. Дзюра В.О., Кривий П.Д., Тимошенко Н.М. Вплив кривини циліндричної поверхні сформованої точінням або розточуванням на її шорсткість. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016) : матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції (26–29 квітня 2016 р., м. Чернігів). – Чернігів: ЧНТУ, 2016. С. 80-82.

37. В.О. Дзюра, П.Д. Кривий. Обґрунтування конструктивних параметрів інструмента для формування регулярних мікрорельєсів на внутрішніх циліндричних поверхнях. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції 31 травня – 3 червня 2016 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова, д-ра техн. наук – Краматорськ : ДДМА, 2016. С. 46.

38. Дзюра В.О. Імовірно-статистичний метод визначення впливу подачі і радіуса при вершині різця на шорсткість поверхні сформованої точінням. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 7-ї Міжнародної науково-практичної конференції 22-23 вересня 2016 року – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016. С. 91-92.

39. Кривий П.Д., Сенік А.А., Дзюра В.О., Кобельник В.Б. Дослідження мікрогеометрії поперечних циліндричних перерізів циліндричних поверхонь на прикладі шкворневих втулок. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 7-ї Міжнародної науково-практичної конференції 22-23 вересня 2016 року – Херсон :

Херсонська державна морська академія, 2016. С. 188-189.

40. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Апостол Ю.О. До питання вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь деталей машин. Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство. Міжнародна науково-технічна конференція, 21-22 вересня 2017 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2017. С. 23-24.

41. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Сенік А.А. До питання точності форм згортних втулок за параметром відхилення від круглості. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції 28-29 вересня 2017 року – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2017. С. 188-189.

42. Кривий П.Д., Крупа В.В., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М. Імовірнісно-статистичний метод дослідження сили різання при точінні. International research and practice conference “Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences” : Conference proceedings, December 27-28, 2017. p.101-104.

43. Дзюра В. О. Інструмент для вібраційного обкочування внутрішніх циліндричних поверхонь і методика визначення його конструктивних параметрів / Дзюра В. О., А. Й. Матвіїшин, О. Ю. Радзіховський // Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 28-29 листопада 2018 року. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. Том 1. С. 151–152.

44. Уточнений метод апіорно-емпіричних функцій визначення закону розподілу та його характеристик на основі малої вибірки / П.Д. Кривий, Н.М. Тимошенко, В.О. Дзюра, В.Р. Кобельник // Матеріали Міжнародної науково-технічної 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, 14-15 травня 2020 року. Тернопіль: ТНТУ, 2020. С. 132–133.

Публікації, які додатково відображають результати дисертації

45. Кривий П.Д., Кашуба Н.П., Дзюра В.О., Кобельник В.Р. Інструмент для чистової обробки поверхневим пластичним деформуванням. Деклараційний патент на корисну модель №86461 В24В 39/04; заявлено 05.08.2013, опубліковано 25.12.2013, бюл. № 24. *(частка всіх авторів однакова)*.

46. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Крупа В.В. Дворіздева розточувальна головка. Деклараційний патент на корисну модель №93918 В23В 29/03; заявлено 10.04.2014, опубліковано 27.10.2014, бюл. № 20. *(частка всіх авторів однакова)*.

47. Дзюра В.О. Дворіздева розточувальна головка. Деклараційний патент на корисну модель №94017 В23В 29/03; заявлено 12.05.2014, опубліковано 27.10.2014, бюл. № 20.

48. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Кашуба Н.П., Апостол Ю.О. Головка для формування регулярних мікрорельєфів вібраційним обкочуванням. Деклараційний патент на корисну модель № 94045 В24В 39/00; заявлено 19.05.2014., опубліковано 27.10.2014, бюл.№ 20. *(частка всіх авторів однакова)*.

49. Кривий П.Д., Дзюра В.О. Дворіздева розточувальна головка. Деклараційний патент на корисну модель №101187 В23В 29/03; заявлено 02.04.2015, опубліковано 25.08.2015, бюл. №16 *(частка всіх авторів однакова)*.

50. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Грушицький О.М., Колісник І.В. Дворіздева розточувальна головка. Деклараційний патент на корисну модель 99316 В23В 29/03; заявлено 29.12.2014, опубліковано 25.05.2015., бюл. №10. *(частка всіх авторів однакова)*.

51. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Кашуба Н.П. Інструмент для чистового фінішного оброблення зовнішніх циліндричних поверхонь. Патент на винахід №108691 В24В 39/04; заявлено 09.10.2013, опубліковано 25.05.2015, бюл. № 10. *(частка всіх авторів однакова)*.

52. Дзюра В.О. Інструмент для чистового фінішного оброблення циліндричних поверхонь. Деклараційний патент на корисну модель № 103173

B24B 39/00; заявлено 08.05.2015, опубліковано 10.12.2015, бюл. № 23.

53. Кривий П.Д., Дзюра В.О. Валик для дослідження шорсткості оброблюваної поверхні. Деклараційний патент на корисну модель № 105545 G01N 33/20; заявлено 21.09.2015, опубліковано 25.03.2016, бюл. № 6. (*частка всіх авторів однакова*).

54. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Дичковський М.Г. Дворіздева розточувальна головка з торсіонним гасником коливань. Деклараційний патент на корисну модель № 106945, B23B 29/03; заявлено 30.11.2015, опубліковано 10.05.2016, бюл. № 9. (*частка всіх авторів однакова*).

55. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Грицай І.Є., Яцюк В.А. Спосіб визначення впливу подачі на шорсткість оброблюваної поверхні різанням. Патент на винахід № 112248 G06F 17/10, G01B 21/30, G01B 7/34, B23B 25/06; заявлено 02.04.2015, опубліковано 10.08.2016, бюл. № 15. (*частка всіх авторів однакова*).

56. Кривий П.Д., Дзюра В.О. Спосіб формування регулярного мікрорельєфу на частково-циліндричних поверхнях. Деклараційний патент на корисну модель № 109558 B23B 29/0, B24B 39/00, B21H 3/00; заявлено 30.11.2015, опубліковано 25.08.2016, бюл. № 16. (*частка всіх авторів однакова*).

57. Дзюра В.О. Спосіб визначення впливу кривизни на шорсткість обробленої поверхні. Деклараційний патент на корисну модель № 111018 G01B 21/30; заявлено 28.04.2016, опубліковано 25.10.2016, бюл. № 20.

58. Дзюра В.О., Кривий П.Д. Дворіздева адаптивна розточувальна головка. Патент на винахід № 114667 B23B 29/03; заявлено 16.10.2015, опубліковано 10.07.2017, бюл. № 13. (*частка всіх авторів однакова*).

59. Дзюра В.О. Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням. Деклараційний патент на корисну модель № 121381 B24B 39/00; заявлено 13.03.2017, опубліковано 11.12.2017, бюл. № 23.

60. Кривий П.Д., Крупа В.В., Дзюра В.О. Самоцентруючий

трикулачковий патрон. Деклараційний патент на корисну модель № 121078 В23В 31/02, В23В 31/10; заявлено 12.06.2016, опубліковано 27.11.2017, бюл. № 22. *(частка всіх авторів однакова)*.

61. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Дичковський М.Г. Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу віброобкочуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях. Патент на винахід № 117380 В24В 39/02; заявлено 25.10.2017, опубліковано 25.07.2018, бюл. № 20. *(частка всіх авторів однакова)*

62. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Апостол Ю.О., Тимошенко Н.М. Спосіб вимірювання шорсткості циліндричної поверхні. Деклараційний патент на корисну модель № 129762 G01В 21/30; заявлено 14.05.2018, опубліковано 12.11.2018, бюл. № 21. *(частка всіх авторів однакова)*

63. Дзюра В.О. Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням. Патент на винахід № 118890 В24В 39/00; заявлено 13.03.2017, опубліковано 25.03.2019, бюл. № 6.

64. Дзюра В.О. Спосіб формування частково-регулярного мікрорельєфу на циліндричних поверхнях вібраційним обкочуванням. Деклараційний патент на корисну модель № 139790 МПК В24В 39/00, заявлено 30.05.2019, опубліковано 27.01.2020, бюл. № 2.

65. Марущак П.О., Дзюра В.О., Литвиненко Я.В. Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу. Деклараційний патент на корисну модель № 141520 В24В 39/00; заявлено 21.10.2019, опубліковано 10.04.2020, бюл. № 7. *(частка всіх авторів однакова)*.

66. Дзюра В.О.; Ткаченко І.Г.; Качалуба Т.Р. Дворіздева адаптивна розточувальна головка. Деклараційний патент на корисну модель № 142221 В23В 29/03, заявлено 04.11.2019, опубліковано 25.05.2020, бюл. № 10. *(частка всіх авторів однакова)*.

67. Марущак П.О., Литвиненко Я.В., Дзюра В.О. Спосіб визначення параметрів профілограми. Деклараційний патент на корисну модель № 142750 G01В 21/30; заявлено 02.01.2020, опубліковано 25.06.2020, бюл. № 12. *(частка*

всіх авторів однакова).

68. Дзюра В.О., Марущак П.О., Сташків М.Я., Цьонь О.П. Інструмент для формування мікрорельєфу на торцевих поверхнях тіл обертання ротаційним способом. Деклараційний патент на корисну модель № 145673 В24В 39/00; заявлено 03.08.2020, опубліковано 29.12.2020, бюл. №24. *(частка всіх авторів однакова).*

69. Свідоцтво № 96138 Україна. Комп'ютерна програма “Визначення параметрів мікронерівностей поверхні металів. «Analiz relefu»/ Я.В. Литвиненко, П.О. Марущак, В.О. Дзюра; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11. *(частка всіх авторів однакова).*

70. Свідоцтво № 100743 Україна. Комп'ютерна програма. «Моделювання реалізації мікрорельєфу». Я.В. Литвиненко, П.О. Марущак, В.О. Дзюра; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11. *(частка всіх авторів однакова).*

71. Дзюра В.О., Марущак П.О., Марущак О.В. Спосіб формування частково регулярного мікрорельєфу на торцевих поверхнях тіл обертання. Деклараційний патент на корисну модель № 146386 В24В 1/00; В24В39/00. заявлено 01.09.2020, опубліковано 17.02.2021, бюл. № 7. *(частка всіх авторів однакова).*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	27
ВСТУП	30
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ КЛАСУ «ТІЛА ОБЕРТАННЯ» (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ)	40
1.1 Аналіз об'єктів дослідження та технічних вимог до них	40
1.2 Аналіз технологічних методів та засобів забезпечення якісних параметрів поверхонь деталей класу «тіла обертання»»	49
1.3 Методи формування регулярного мікрорельєфу на поверхнях деталей класу «тіла обертання»	55
1.4 Аналіз результатів досліджень забезпечення параметрів якості поверхонь деталей машин	64
1.4.1 Аналіз результатів досліджень забезпечення геометричних параметрів поверхонь деталей машин	64
1.4.2 Аналіз результатів досліджень забезпечення фізико- механічних властивостей поверхонь деталей машин	74
1.5. Висновки до першого розділу	98
РОЗДІЛ 2	
ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ КЛАСУ «ТІЛА ОБЕРТАННЯ»	100
2.1 Технологічна спадковість і точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь гідроциліндрів	100

2.2	Оптимізація технологічного процесу формування поверхні гідроциліндра на основі аналізу топографії її мікрорельєфу утвореного на різних операціях	113
2.3	Імовірно-статистичний метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні сформованої точінням	128
2.4	Імовірно-статистичний метод оцінювання впливу форми та розмірів на шорсткість поверхні сформованої токарною обробкою	142
2.5	Спосіб аналітичного опису профілю поверхні	153
2.6	Висновки до другого розділу	161

РОЗДІЛ 3

ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ НА ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХНЯХ

3.1	Особливості процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях	163
3.1.1	Дослідження впливу зовнішніх чинників на переносний обертальний рух оброблювального деталі	164
3.2.	Динаміка відносного руху оброблювальної циліндричної деталі в процесі нанесення мікрорельєфу	167
3.2.1	Динаміка відносного поздовжнього руху оброблювальної деталі	167
3.2.2	Динаміка відносних крутильних коливань оброблювальної деталі	175
3.3	Висновки до третього розділу	182

РОЗДІЛ 4	
НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЧАСТКОВО	
РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ НА ТОРЦЕВИХ	
ПОВЕРХНЯХ ДЕТАЛЕЙ КЛАСУ «ТІЛА ОБЕРТАННЯ»	
184	
4.1.	Класифікація частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання»
184	
4.2	Моделювання частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» вібраційним способом
191	
4.3	Визначення площі канавок трикутної форми частково регулярного мікрорельєфу сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання»
200	
4.4.	Визначення оптимальних параметрів канавок частково регулярного мікрорельєфу I типу сформованого на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання»
206	
4.5	Визначення оптимальних параметрів канавок частково регулярного мікрорельєфу II типу сформованого на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання»
217	
4.6	Визначення оптимальних параметрів регулярного мікрорельєфу сформованого на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання»
225	
4.7	Висновки до четвертого розділу
248	

Розділ 5

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ, СФОРМОВАНИХ НА ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХНЯХ ДЕТАЛЕЙ КЛАСУ «ТІЛА ОБЕРТАННЯ» 251

- 5.1 Обладнання та інструмент для проведення експериментальних досліджень 251
- 5.2 Програма і методика проведення експериментальних досліджень 254
- 5.3 Результати експериментальних досліджень ширини канавки мікрорельєфу 267
- 5.4 Дослідження шорсткості поверхні із регулярними мікрорельєфами 272
- 5.5 Висновки до п'ятого розділу 275

Розділ 6

ПРОЕКТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ 276

- 6.1 Розрахунок параметрів дворіцевої адаптивної розточувальної головки 276
- 6.2 Розрахунок конструктивних параметрів інструмента для оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним розкочуванням 289
- 6.3 Вплив розміщення деформуєвальних елементів на параметри регулярного мікрорельєфу 303
- 6.4 Забезпечення регулярності мікрорельєфу кінематичним зв'язком верстату 313
- 6.5 Конструювання нових конструкцій адаптивних розточувальних головок 316

6.6	Спосіб вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь	318
6.7	Конструювання інструменту для формування регулярних мікрорельєфів на зовнішніх циліндричних поверхнях	324
6.8	Пристрій для формування регулярного мікрорельєфу на зовнішніх циліндричних поверхнях	328
6.8	Висновки до шостого розділу	330
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	332
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	336
	ДОДАТКИ	369

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

$M(\Delta)$	математичне сподівання випадкової величини Δ (відхилення від круглості)
$f(\Delta)$	випадкова періодична функція
a_k і b_k	коефіцієнти ряду Фур'є
$D(\Delta)$	дисперсія випадкової величини Δ
Δ_{\max}	максимальне значення випадкової величини
t_i	глибина різання, мм;
s_i	подача, мм/об;
V_i	швидкість різання, м/хв;
n_i	кількість обертів, об/хв.;
R_{kc}	радіус середньої лінії канавок, мм;
R_k	відстань від центра обертання торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання» до основи елемента канавки ЧРМ мм;
ρ_k	радіус відбитка канавки, мм;
γ_d	параметр частково регулярного мікрорельєфу, що характеризує розміщення осьових ліній симетрії канавок між собою
α_k	центральний кут канавки, град;
ω	кутова швидкість обертання заготовки, c^{-1} ;
F_n	відносна площа віброобкочування, %;
F_{el}	площа елемента канавки частково регулярного мікрорельєфу, $мм^2$;
n_{el}	кількість елементів частково регулярного мікрорельєфу на проміжку $[0..2\pi]$, шт;
A_k	амплітуда елемента частково регулярного мікрорельєфу, мм;
i	кількість осциляцій при формуванні мікрорельєфу, подв. ходів
S_o	осьовий крок канавок, мм;
S_k	коловий крок елемента частково регулярного мікрорельєфу, мм;

φ_k	кутовий крок елемента частково регулярного мікрорельєфу, град.;
σ_T	границя текучості;;
σ_B	границя тимчасового опору
δ_5	відносне видовження після розриву, %
ψ	відносне звуження після розриву, %
ES	верхнє граничне відхилення, мм;
EI	нижнє граничне відхилення, мм.
D_v	обертний рух диска
D_s	рух подачі інструменту
D_i	осциляційний зворотньо-поступальний рух інструменту
S_{ov}	площа перекриття канавок мікрорельєфу, мм ² ;
S_{s1}	площа сегмента канавки 1, мм ² ;
S_{t1}	площа трапеції канавки 1, мм ² ;
S_{s2}	площа сегмента канавки 2, мм ² ;
S_{t2}	площа трапеції канавки 2, мм ² ;
$\Delta_{важ}$	допустимий зазор розточної головки, мм;
$l_{важ}$	відстань від осі обертання рівноплечого важеля, мм;
$\alpha_{важ}$	кут повороту рівноплечого важеля, град;
$R_{важ}$	відстань від осі обертання рівноплечого важеля до центра радіуса вершини різця, мм;
$a_{дон}$	допуск на оброблюваний розмір, мм;
$r_{зв}$	радіус основи упорного гвинта, мм.
R_{pk}	висота зменшеного виступу;
R_k	глибина серцевини профілю;
R_{vk}	глибина зменшеної западини;
Mr_1	доля матеріалу у відсотках, відділена лінією, яка розділяє виступи від серцевини профілю;
Mr_2	доля матеріалу у відсотках, відділена лінією, яка розділяє западини від середини профілю

НВ	Твердість
РМ	регулярний мікрорельєф
ЧРМ	частково регулярний мікрорельєф
НРМ	неперервні регулярні мікронерівності
ТПТО	торцеві поверхні тіл обертання
ВЦП	внутрішня циліндрична поверхня
ВЦП	Внутрішня циліндрична поверхня

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з найбільших класів деталей у номенклатурі машинобудівних виробництв є клас «тіла обертання». Деталі цього класу (гільзи гідроциліндрів автомобільних кранів, гідроциліндрів механізмів керування муфтами щеплення, циліндрів підсилення механізмів повороту автомобілів, гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання, конусів варіаторних трансмісій тощо), в основному, працюють у sprzęженні з іншими деталями та забезпечують передачу руху від одного рухомого об'єкту до іншого. Тому забезпечення необхідної якості робочих поверхонь цих деталей і, як наслідок, заданих експлуатаційних властивостей є важливою задачею машинобудівного виробництва.

Важливими параметрами якості обробленої поверхні є її точність та шорсткість, однак забезпечення цих параметрів не завжди забезпечує належні експлуатаційні властивості робочих поверхонь деталей механізмів та машин.

Для деталей класу «тіла обертання», які працюють у важких умовах експлуатації важливою експлуатаційною властивістю робочих поверхонь є маслоємність та зносостійкість поверхні, які забезпечується технологічною операцією обкочування шляхом формуванням на цих поверхнях регулярних мікрорельєфів.

Оцінку експлуатаційних властивостей за параметрами якості поверхні можна проводити за профілограмою шорсткості поверхні, використовуючи групу параметрів R_k діаграми Аббота-Фаєрстоуна. Таке оцінювання регламентоване стандартом ISO 4287 1996 і усуває необхідність у проведенні експлуатаційних випробувань.

Усі ці аргументи вказують на необхідність та актуальність створення наукових основ забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» технологічними методами на основі аналізу умов експлуатації.

Параметри якості робочих поверхонь деталей машин досліджували

закордонні та вітчизняні вчені. Дослідженням параметрів якості поверхні, сформованих на фінішних операціях технологічного процесу присвячені роботи Бартарі Г., Фанга Н., Гватама Д., Хасана А.М., Вітенберга Ю.Р., Луціва І.В., Добротворського С.С., Дяченко П.Е., Ісаєва А.І., Марчука В.І., Лук'янова В.С., Маталіна А.А., Попандопуло К.Х., Гаврилова А.І., Хусу А. П., Ящерицина П.І [5, 23, 27, 99, 130, 138, 142, 197, 196, 203, 239, 255, 262, 272].

Над проектуванням інструментів для обробки різанням робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» та дослідженням їх оптимальних конструктивних параметрів працювали Луців І.В., Вовк Ю.Я., Боярський В.Г., Кирсанов С.В., Лепихов В.Г. [198, 94, 100, 155, 190]. Розробленням математичних моделей, що описують регулярні мікрорельєфи займались Шнейдер Ю.Г., Киричок П.О., Мельников П.А., Кузьмін Ю.П., Кривий П.Д., Моргунов А. П. [268, 205, 182, 212, 207]. Дослідженням експлуатаційних властивостей поверхонь із регулярними мікрорельєфами займалися Шнейдер Ю.Г., Гавриш А.П., Афтаназів І.С., Киричок П.О., Сяо С., Кочин А.Н., Лешенкова Л.Р., Суслов А.Г. [8, 103, 86, 147, 153, 158, 188, 191, 252, 269]. Розрахунком оптимальних режимів формування регулярних мікрорельєфів, їх форм та розмірів присвячені роботи Гомеза Г., Джона М., Вілсона А, Лакейла Л., Ліня С., Нагіта Г., Афтаназіва І.С., Киричка П.О., Лотоцької О.І., Кусого Я.М., Погодаєва В.П., Фельдмана Я.С. [24, 41, 44, 84, 152, 194, 186, 189, 193, 194, 238, 256]. Проектуванням інструментів для формування регулярних мікрорельєфів присвячені праці Киричка П.О., Славова С., Дімітрова Д., Ілієва І., Афтаназіва І.С., Гурова Р.В., Проскурякова Ю.Г., Хмілярчука О. І., Жетесова Г. С., Одинцова Л.Г. [148, 85, 58, 116, 210, 240, 242, 261].

З проведеного огляду літературних та патентних джерел виявлено низку недоліків у методах та засобах забезпечення параметрів якості поверхонь деталей класу «тіла обертання», які полягають у наступному: по-перше, дослідники, як правило, розглядають один із параметрів якості поверхні без урахування взаємного впливу на інші параметри якості, а також не враховують технологічної спадковості і, відповідно, не визначають першопричин низької

якості поверхонь; по-друге, при визначенні впливу різних параметрів на параметри якості поверхні, при механічній обробці не враховано впливу таких параметрів поверхні як діаметр поверхні, стохастичність подачі (для верстатів із механічними коробками подачі) та інші; по-третє, не сформовано наукові основи формування частково-регулярних мікрорельєфів на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання», зокрема не розроблено математичні моделі таких мікрорельєфів, не визначено закономірності для розрахунку основних геометричних і технологічних параметрів для їх формування.

Аналіз існуючих методів оцінювання точності форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь показав, що таке оцінювання здійснюється, як правило, після фінішної операції технологічного процесу. Одним із пояснень такого стану є відсутність високопродуктивного ймовірнісного методу оцінювання впливу технологічної спадковості на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь, на основі якого можна було б здійснювати корекцію технологічних операцій, направлену на їх удосконалення, й забезпечення високої якості обробки циліндричних поверхонь.

Тому дослідження впливу технологічної спадковості на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь, здійснене в імовірнісному аспекті з використанням теорії малих вибірок, є безперечно актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано згідно з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки України 06 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» та в рамках 6-ти науково-дослідних робіт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, зокрема таких: «Підвищення ефективності формування якісних параметрів робочих поверхонь деталей машин», № держреєстрації 0115U002454 «Створення нового покоління методів фрактодіагностування матеріалів і конструкцій на основі використання нейронних мереж», № держреєстрації 0119U001323, «Розроблення

діагностичного комплексу на базі глибоких нейронних мереж для розпізнавання множинних поверхневих дефектів металоконструкцій», № держреєстрації 0120U101924 та протоколу намірів про науково-технічне співробітництво із ПАТ «Дрогобицький завод автомобільних кранів» від 28 серпня 2012 року.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розвиток наукових основ комплексного забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» і, відповідно, їх зносостійкості й маслоємності технологічними методами на основі аналізу умов експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі фундаментальні та прикладні завдання:

1. Розробити методологію комплексного забезпечення параметрів якості поверхонь деталей класу «тіла обертання» в процесі їх механічного оброблення на основі врахування умов експлуатації виробу.

2. На основі аналізу статистичних даних, отриманих у виробничих умовах при виготовленні деталей з робочими поверхнями деталей класу «тіла обертання» розробити метод врахування впливу технологічної спадковості на точність форми поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь деталей класу «тіла обертання».

3. Використавши експериментальні дані параметра шорсткості циліндричної поверхні, сформованої токарними операціями, розробити ймовірно-статистичний метод оцінювання впливу подачі, форми та розмірів циліндричної поверхні на величину параметра шорсткості для деталей класу «тіла обертання».

4. Розробити математичну модель динамічного процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні деталей типу «тіла обертання» із використанням дельта-функції Дірака для аналітичного описування точкового характеру взаємодії деформівного елемента із оброблюваною поверхнею і траєкторії його руху.

5. Прокласифікувати частково регулярні мікрорельєфи, сформовані на

торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» за виявленими класифікаційними ознаками, з метою розроблення математичних моделей, які описують множину їх варіантів.

6. Отримати аналітичні залежності, які описують взаємозв'язок площі та геометричних параметрів канавок частково регулярного мікрорельєфу, сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання», операцією накатування, що дасть можливість забезпечити однакову відносну площу мікрорельєфу.

7. Провести експериментальні дослідження та отримати регресійні залежності, які описують вплив технологічних режимів процесу формування регулярних мікрорельєфів на торцевих поверхнях деталей класу диски на ширину сформованої канавки та шорсткість поверхні зі сформованим мікрорельєфом.

8. Розробити технологічне спорядження та інженерні методи розрахунку їх конструктивних параметрів для забезпечення базових технологічних операцій механічного оброблення та формування регулярних мікрорельєфів.

Об'єкт дослідження – функціонально-орієнтований технологічний процес механічного оброблення робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання».

Предмет дослідження – взаємозв'язки між параметрами якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» і режимами обробки на основі комплексного підходу та аналізу умов експлуатації.

Методи дослідження. При виконанні роботи теоретичні дослідження проведено із використанням елементів теорії різання, теорії малих вибірок, теорії пружності, теорії диференціальних рівнянь, технічної теорії поздовжніх та крутильних коливань твердих тіл. Динаміку процесу формування регулярного мікрорельєфу описано за допомогою дельта-функцій Дірака із використанням методу регуляризації.

Планування та опрацювання результатів експериментальних досліджень встановлення закономірностей впливу режимів оброблення походились із

використанням теорії багатофакторного аналізу.

Експериментальні результати опрацьовано статистичними методами, використовуючи регресійний аналіз. Для реалізації математичних та імітаційних моделей використано ПП: MathCAD, Statistika, SolidWorks, для оцінювання зображень та визначення параметрів мікрорельєфу – PortableCapture Pro.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розвитку експериментальних і теоретичних методів технологічного забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» з врахуванням комплексного підходу та умов експлуатації для забезпечення необхідної їх зносостійкості й маслоємності:

- отримав подальший розвиток комплексний підхід до забезпечення параметрів якості поверхонь деталей класу «тіла обертання» на основі статистичних методів оцінювання на етапі механічного оброблення, з врахуванням умов їх експлуатації;

- розроблено теоретичні засади врахування впливу технологічної спадковості на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь, отриманих на операціях технологічного процесу;

- розроблено новий метод визначення впливу осьової подачі, форми та розмірів циліндричної поверхні сформованої токарними операціями на її мікрогеометрію, та встановлено основні закономірності цього впливу;

- вперше розроблено нову математичну модель динамічного процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні з урахуванням силових характеристик процесу формування регулярних мікрорельєфів та кінематику руху деформуючого інструменту;

- вперше розроблено класифікацію частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання», які враховують їх характеристики на основі введеного поняття кутового кроку канавки та запропоновано множину варіантів нових математичних моделей описування їх геометричних особливостей та взаємного розташування;

- вперше отримано математичні моделі частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання», які описують взаємозв'язок геометричних параметрів мікрорельєфу із режимами формоутворення на операції накатування та дозволяють отримати координати опорних точок для керуючих програм для верстатів з ЧПК.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені в роботі методи та прийняті технічні рішення створили комплексну основу для створення раціональних технологічних процесів виготовлення внутрішніх циліндричних і торцевих поверхонь деталей класу «тіла обертання», в структурі яких відпала потреба використання складних та вартісних операцій тонкого оброблення. Скорочення кількості викінчувальних операцій на завершальному етапі виготовлення таких деталей забезпечує істотне зменшення витрат та підвищення ефективності технологічних процесів одночасно з досягненням високих експлуатаційних параметрів поверхонь під час роботи деталей у спряжених парах завдяки формуванню заданих мікрорельєфів.

Вперше з використанням фрезерних верстатів з ЧПК розроблено спосіб формування частково регулярного мікрорельєфу, який забезпечує однакову відносну площу мікрорельєфу V-подібної форми I і II виду, сформованого на різній відстані від центра обертання торцевої поверхні. Розроблено програмне забезпечення для побудови математичної моделі профілю шорсткості поверхні на основі параметрів профілограми.

Встановлено вплив зусилля деформування, швидкості подачі та осьового кроку канавок на середнє значення ширини канавки сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання» частково регулярного мікрорельєфу. Отримано регресійні залежності, поверхні відгуку та їх двомірні перерізи, які описують вплив цих параметрів на ширину канавки в межах, встановлених при проведенні експерименту, рівнів варіювання змінних факторів.

Розроблено інструментальне забезпечення та інженерні методики розрахунку конструктивних параметрів інструментів для забезпечення

запропонованих технологічних операцій механічного оброблення та формування регулярних мікрорельєфів.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у вигляді конструкцій інструментів, методик розрахунку параметрів оброблення в цілому або його складових на ТОВ «ВКФ ДЗАК» (м. Дрогобич), ТОВ «ОСП Корпорація Ватра» (м. Тернопіль). Також результати впроваджено у вигляді комплексу комп'ютерних програм та його складових на кафедрі інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Окремі методики для оцінювання параметрів якості поверхонь на основі теорії малої вибірки впроваджено в навчальний процес на кафедрах приладів і контрольно-вимірювальних систем, автомобілів та верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. На впроваджений комплекс програм отримано два свідоцтва про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми. Інші технічні рішення захищені понад двадцятьма патентами на корисні моделі й п'ятьма патентами України на винахід.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи отримано здобувачем самостійно, постановку завдань, аналіз і трактування результатів – спільно з науковим консультантом. У технічних рішеннях частка всіх співавторів однакова.

В наукових працях, опублікованих із співавторами, автору дисертації належать: у [1, 2, 26, 32] – розроблення методу оцінювання технологічної спадковості циліндричних поверхонь, зокрема відхилень від круглості, на операціях технологічного процесу, у [10] – оцінювання зміни параметрів якості поверхні в процесі виконання технологічних операцій для деталей із робочими циліндричними поверхнями; у [3, 27, 28, 38, 55] – розроблення методу оцінювання впливу подачі на верстатах з механічними коробками подач на шорсткість поверхні, отриманої під час токарних операцій; у [5, 34, 36, 57] – розроблення методу оцінювання впливу розмірів та форми обробленої поверхні на шорсткість поверхні, отриманої під час токарних операцій технологічного

процесу; у [8] – розроблення методики розрахунку оптимальних геометричних параметрів частково регулярних мікрорельєфів I виду, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання», у [9] – виведення аналітичних залежностей та умов стадіювання для визначення площі перекриття частково регулярних мікрорельєфів III виду, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання»; у роботі [4] – проведення моделювання робочого процесу у віртуальному середовищі; у [6, 7, 18] – розрахунок значень параметрів із визначення впливу середовища на параметри шорсткості циліндричної поверхні; у [13, 14] – виведення аналітичних залежностей для визначення конструктивних параметрів інструменту; у [45–52, 58–61, 65, 66, 68] – розроблення конструкцій інструменту для обробки різанням та формування регулярного мікрорельєфу на поверхнях деталей класу «тіла обертання»; у [12] – обґрунтування параметрів фрикційних поверхонь обертання, оброблених методами поверхневого пластичного деформування для забезпечення максимальної зносостійкості.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи апробовано на наукових конференціях Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя (м. Тернопіль, 2012–2015 рр.), на XII Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Київ, 2012), на Міжнародній конференції ASME 2014 (Detroit, USA, 2014), на 5 Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (м. Херсон, 2014, 2016, 2017), на III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів, 2015, 2016), на дванадцятому Міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2015), на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів» (м. Одеса, 2015), на XV Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих:

прогресивні ідеї–наука–виробництво» (Житомир, 2015), на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем КЗЯТПС 2016» (м. Чернігів, 2016), на XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2016), на міжнародній науково-практичній конференції «Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences» (Radom, Poland, 2017). У цілому роботу представлено та обговорено на наукових тематичних семінарах:

- університетському науково-технічному семінарі № 6 «Машинобудування, машинознавство та обробка матеріалів» у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя;
- розширеному засіданні наукового семінару кафедри прикладної механіки та мехатроніки у Луцькому національному технічному університеті;
- науковому семінарі кафедри експлуатації та ремонту машин у Центральноукраїнському національному технічному університеті.

На всіх зазначених семінарах робота отримала позитивну оцінку.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 71 науковій праці, із них 10 – у фахових наукових періодичних виданнях України (5 – без співавторів), 10 наукових статей у міжнародних журналах, індексованих у наукометричній базі Scopus (Q 2), 24 – матеріали наукових конференцій. Отримано 27 об'єктів права інтелектуальної власності, з яких 5 – патенти на винаходи, 20 – патенти на корисні моделі, 2 – свідоцтва реєстрації авторського права на твір.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Основний зміст викладено на 335 сторінках друкованого тексту. В роботі 106 рисунків, 37 таблиць, а також 13 додатків, список посилань містить 272 найменування.

РОЗДІЛ 1

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ
ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ КЛАСУ «ТІЛА ОБЕРТАННЯ»
(ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ)**

1.1 Аналіз об'єктів дослідження та технічних вимог до них

В автомобілях, тракторах, верстатах, ковальсько-пресових, дорожніх, будівельних, харчопереробних, комунальних, сільськогосподарських та інших машинах, які вироблялись в Україні, широко застосовується гідропривід. Виконавчим органом гідросистеми машини при цьому найчастіше служить один або кілька силових та маніпуляційних гідроциліндрів. Найбільш відповідальною і складною деталлю останніх з позиції виготовлення та ремонту є гільза, оскільки її отвір, що має, як правило, відношення довжини до діаметру понад 8-10, належить до класу глибоких. Крім того, поверхня отвору повинна відповідати досить жорстким вимогам за параметрів точності: некруглість в межах Н7-Н9 і відхилення від прямолінійності твірної (нециліндричність) до 0,15-0,25 мм на 1000 мм довжини отвору, а також шорсткості обробленої поверхні за параметрів Ra не вище 0,05-0,15 мкм.

Виробництво високоякісних гідроциліндрів для техніки різного призначення залишається однією з найважливіших задач в машинобудуванні. Спеціалізовані підприємства повністю не забезпечують потреби виробників машин. Багато заводів, що випускають спеціалізовану техніку, змушені самостійно виготовляти для неї гідроциліндри. При цьому використовують складні і трудомісткі технології, які вимагають спеціального обладнання та інструменту, екологічно шкідливих ділянок та т.п. Зношеність обладнання, відсутність належної якості комплектуючих і матеріалів, брак фахівців не дозволяють випускати машини сучасного технічного рівня.

Передові закордонні компанії пішли іншим шляхом: вони максимально використовують покупні комплектуючі, виготовлені спеціалізованими

підприємствами, які досягли досконалості своїх виробів. Одні виробники хонінгують, розвертають або розкатують труби, отримуючи високий рівень чистоти внутрішньої поверхні, інші - обробляють і хромують штоки, забезпечуючи їм необхідну твердість і опір агресивним зовнішнім впливам.

Таким чином підприємства, які виготовляють самі гідроциліндри фактично займаються лише їх складанням. Такий підхід істотно скорочує капіталовкладення у виробництво, оскільки всі операції можуть виконуватися на універсальному обладнанні і не вимагають дорогих спеціальних верстатів, оригінального інструменту і складної оснащення. Виключаються також екологічно шкідливі ділянки та постійна турбота про утилізацію відходів виробництва при хромування штоків.

Використання високоякісних комплектуючих економічно виправдано. Відмова від малоефективних і трудомістких виробничих операцій дає можливість скоротити персонал або переорієнтувати його на інші види робіт. А головне, подібні технології забезпечують високий рівень якості гідроциліндра, підвищують гнучкість виробництва, створюють можливість швидкого розширення асортименту продукції, що випускається. На рис. 1.1 наведено типову конструкцію плунжерного гідроциліндра виробництва Дрогобицького заводу автомобільних кранів ("ДЗАК") [28], з яким в установи, де виконувалась дисертація укладено договір про науково-технічне співробітництво (додаток 1). Конструкції гідроциліндрів виробництва "ДЗАК" і їх технічна характеристика наведені за посиланням [28].

Об'єктом досліджень в дисертаційній роботі був гідроциліндр КС-4574.63.900 телескопування (випускання) стріли автомобільного крана КТА-25, що виготовляється на Дрогобицькому заводі автомобільних кранів (Україна) (рис. 1).

До поверхні гільзи гідроциліндра, ставляться високі вимоги по точності форми, а саме – відхилень від прямолінійності в повздовжньому та відхилень від круглості в поперечному перерізі. Такі вимоги до гідроциліндрів обумовлені тим, що їх експлуатація не допускає перетікання робочої рідини з однієї порожнини в іншу. Технічні вимоги до гідроциліндрів регламентуються ГОСТ [105].



Рисунок 1.1 – Гідроциліндр плунжерний КС-4574.63.900-03.00 телескопування стріли автомобільного крана виробництва “ДЗАК” [28]

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика [28]

Клас гідроциліндра		С
ККД заг., не менше		0,8
Діаметр плунжера, мм		75,95, 115
Загальний хід плунжера/ів, мм		3436
Тиск, МПа		
номінальний		16
максимальний		20
зрушення, не більше		2
холостого ходу		0,5
Швидкість гідроциліндра (максимальна), м/с		0,3

Технічні вимоги до виготовлення гідроциліндрів:

Точність внутрішнього діаметра гільзи по 5, 6 квалітету.

Овальність конусність в межах 0,01мм;

Шорсткість дзеркала гільзи $Ra=0,08-0,04$ мкм;

Биття посадочних поясків відносно поверхні дзеркала не більше 0,03-0,1 мм;

Різниця биття верхнього і нижнього поясків при замірі в одній площині не більше 0,08 мм;

Шорсткість посадочних поверхонь $Ra=0,32-1,25$ мкм.

Таблиця 1.2 – Номенклатура гідроциліндрів виробництва “ДЗАК”

Номенклатура гідроциліндра	Діаметр поршня, мм	Діаметр штока, мм	Хід поршня, мм	Макс. тиск в гідросистемі, МПа	Маса, Кг
Підіймання опор					
КТА-14.02.31-200-03	100	80	550	25	64,4
КТА-14.02.31-200-04	100	80	630	25	66,1
КТА-14.02.31-200-05	100	80	730	25	74
Ц 22А.000	100	80	500	25	54
КС-4574.31.200-05	140	110	500	25	118
КС-4574.31.200-06	140	110	620	25	118
КС-4574.31.200-07	140	110	720	25	118
Висування опор					
КС-4574.31.300-02	63	40	1265	25	35
КС-4574.31.300-03	63	40	1465	25	40
Підіймання стріли					
Ц 51.000-07	200	140	1400	25	358,9
КС-4574.63.400-02	200	140	2275	25	395
КГТ-28.63.400-03	250	160	2275	25	585
Телескопування стріли					
КС-3971.63.900-02	100	80	6000	25	410
КС-3575А.63.900-1-03	100	80	3+3	25	511,5
КС-4574.63.900-03.00	100	80	6000	25	411,8
КС-4574А.63.900-03	100	80	3+3	25	519,2

Гідравлічні циліндри використовуються як основні механізми силових

агрегатів для автокранів вітчизняного виробництва наступних моделей КС-3575А, КС-4574А, КТА-14, КТА-16, КТА-18, КТА-25, КТА-28, КТА-32, КТА-35, КТА-50 на спеціальному обладнанні із застосуванням спеціальної оснастки та інструменту, по ІТ 8-9; (діаметр 63×1500мм, 100×6000мм, 140×700мм, 200×1600мм, 250×2500мм)., тракторах МТЗ-50/80/90, К-700, К 744, Т-25, ДТ-75, ДЗ-42, ДЗ-162, Т-16, ТТЗ-60.11, фронтальних навантажувачах ПКУ-0.8, СНУ-550, ПБМ-800, комбайнах, сівалках, екскаваторах, автогрейдерів, автогідропіднімачах АГП-27, сміттєвозах та багатьох інших машинах.

Аналіз таблиці 1.2 Дає можливість зрозуміти, що робочі поверхні гідроциліндрів мають значну довжину (до 6000 мм) і працюють при високих тисках (до 25 МПа).

Заготовками для гідроциліндрів виробництва «ДЗАК» служать безшовні холодно-тягнуті труби хонінговано або поліровані у відповідності до ISO Н8, а також зварні холодно-тягнуті труби, оброблені по внутрішньому діаметру у відповідності до ISO Н9 або ISO Н10. Для виготовлення гідроциліндрів використовують сталі марок: St 52, St 52.3, St E 460 згідно DIN 2393-1994 та DIN 17102 виготовлені в Німеччині. Аналогами для матеріалу St 52 та St 52.3 в Україні є сталі 17Г1С та 17ГС, а для сталі , St E 460 – 18Г2АФпс.

Хімічний склад вказаних матеріалів наведено в таблиці 1.3, а механічні властивості в таблиці 1.4.

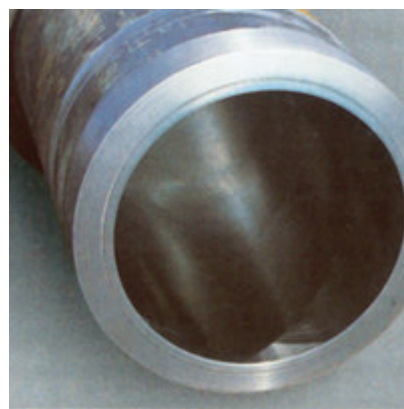


Рисунок 1.2 – Фотографії заготовок гідроциліндрів

Таблиця 1.3 – Хімічний склад матеріалів заготовок гідроциліндрів

Марка сталі	<i>C</i> max	<i>Si</i> min max	<i>Mn</i> min max	<i>P</i> max	<i>S</i> min max
St 52	0,22	0,10-0,55	1,60	0,035	0,035
St 52.3	0,22	0,10-0,55	1,60	0,040	0,015-0,035
St E460	0,22	0,10-0,60	1,00-1,70	0,035	0,030

Продовження таблиці 1.3

Марка сталі	<i>N</i>	<i>Al</i>	<i>Ni</i>	<i>Nb</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Nb+Ti+V</i>
St 52		0,020					
St 52.3							
St E460	0,020	0,020	1,0	0,05	0,20	0,20	0,22

Таблиця 1.4 – Механічні властивості матеріалів заготовок гідроциліндрів

Марка сталі	Границя міцності на розтяг Н/мм ² min max		Мінімальна границя текучості Н/мм ² min	Мінімальне відносне видовження % min	Стан поставки
St 52	570		470	15	ВК+S
	490-630		355	22	NBK
St 52.3	600		520	14	ВК+S
	490-630		355	22	NBK
St E460	700		620	15	ВК+S
	560-730		460	17	NBK

При виготовленні заготовок для гідроциліндрів застосовують наступне маркування: труби ВК+S – після холодного витягування покращені відпуском

під вакуумним захистом інертного газу; труби ВК – без термічної обробки; труби NBK – нормалізовані в контрольованому середовищі при температурі, що перевищує критичну точку.

Аналітичний огляд джерел науково-технічної літератури показав, що на сьогодні відомі та застосовуються у виробництві кілька варіантів побудови технологічних процесів обробки отворів гільз гідроциліндрів (рис. 1.2), які ґрунтуються на операціях чорнового та чистового розточування, розточування самоустановлювальними інструментами, обробки кульковими та роликowymi розкатниками, двоступеневим хонінгуванням, обробці деформуючими та різальними протяжками. Однак, в усіх цих процесах не витримується зміна напрямку головного руху різання чи холодного пластичного деформування в сусідніх операціях на $\pi/2$. В результаті цього поверхні готових отворів набувають чітко вираженої хвилястості, коли фінішною операцією є розточування, якій передує чистове розточування, або отримують на дзеркалі з шорсткістю Ra 0,16-0,32 кілька досить глибоких (до 1 мкм) поздовжніх рисок при фінішній обробці деформуючими протяжками.

Все це призводить до недопустимих перетікань і витікань робочої рідини, оскільки в гідросистемах сучасних машин тиск сягає 15 МПа. Вказані перетікання і особливо витікання робочої рідини з гідроциліндрів, вочевидь, зростатимуть ще й тому, що програми розвитку гідроприводу на найближче майбутнє передбачають перехід гідросистем машин на насоси типу НШ з тиском 25 МПа. Отже, постає також проблема протидії радіальним деформаціям гільзи.

У сучасних машинах та інструментальному технологічному оснащенні існує цілий ряд деталей, які свої функціональні призначення виконують торцевими плоскими або конічними поверхнями. До таких деталей відносяться: конічні диски варіаторів (рис. 1.3) автоматичних трансмісій автомобілів та зернозбиральних комбайнів, деталі торцевих конічних і осьових підшипників, гребені турбокомпресорів магістральних газопроводів, вирубні і витяжні пуансони штампів, матриці і пуансони пресформ, клапани газорозподільчих механізмів двигунів внутрішнього згорання та інші.

До робочих поверхонь таких деталей ставляться підвищені вимоги до їх зносостійкості, що у кінцевому рахунку забезпечує підвищення їх працездатності і довговічності.

Одним із перспективних і ефективних методів покращення фізико-механічних властивостей робочих поверхонь вищезгаданих деталей є метод поверхневого пластичного деформування вібраційним обкочуванням, який забезпечує формування регулярних мікрорельєфів із зміцненням цих поверхонь.



Рисунок 1.3 – Конічні диски варіаторних трансмісій із торцевими поверхнями деталей класу «тіла обертання»

Матеріалом заготовок конуса служать леговані конструкційні сталі 30ХГС 40ХФА, 35ХМ, 40ХН, 25ХГСА, 35ХГСА згідно ГОСТ4543-71.

В нашому випадку матеріал конуса варіатора – 30ХГС ГОСТ4543-71. Хімічний склад матеріалу наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Аналіз хімічного складу матеріалу сталь 30ХГС ГОСТ4543-71.

C	Si	Mn	Cr	S	P	Cu	Ni
0,28-0,35	0,90-1,2	0,80-1,10	0,8-1,10	не більше			
				0,035	0,035	0,3	0,3

Характеристика механічних властивостей матеріалу 30ХГС:

- границя міцності σ_B – 7000 МПа;

- границя текучості σ_T – 360 МПа;
- твердість – 240НВ;
- модуль пружності E – 21600 МПа;
- модуль зсуву G – 8300 МПа;
- відносна деформація (видовження) δ – 40%.

Типова структура технологічних операцій виготовлення привідного конуса включає наступні операції технологічного процесу:

Заготівельна. Отримання штамповки із сталі 30ХГС шляхом гарячого об'ємного штампування.

Токарна. Обробка зовнішніх поверхонь деталі, підрізка торців.

Термічна. Гартування поверхні для нарізання шліців.

Протяжна. Нарізання шліців на внутрішній поверхні шківів.

Токарна. Розточування внутрішніх технологічних канавок.

Токарна. Обточування зовнішньої робочої поверхні диска.

Кругло-шліфувальна. Шліфувати робочі поверхні конуса в розмір.

Шліце-шліфувальна. Шліфування робочих поверхонь шліців.

Контрольна. Контроль відповідальних поверхонь.

Провівши аналіз основних типів пошкоджень робочих поверхонь у вигляді тіл обертання отриманих в процесі експлуатації встановлено, що основним типом пошкоджень є задири, що утворюються внаслідок адгезійного схоплювання. Причиною їх утворення є:

- неоптимальні мікро- та макрогеометричні параметри поверхні;
- неоптимальні експлуатаційні властивості робочих поверхонь;
- неоптимальні умови експлуатації виробу.

Отже, на основі проведеного аналізу встановлено, що причиною виникнення експлуатаційних пошкоджень є, в основному, відсутність об'єкто-орієнтованих технологічних процесів, які б забезпечували задані експлуатаційні властивості робочих поверхонь деталей типу «тіла обертання».

1.2 Аналіз технологічних методів та засобів забезпечення якісних параметрів поверхонь деталей класу «тіла обертання»

Класична структура технологічних операцій технології виготовлення деталей машин із робочими поверхнями деталей класу «тіла обертання» (гільзи циліндрів ДВЗ, гільзи гідроциліндрів, конічні диски варіаторних трансмісій та інші) повинна забезпечити два основних завдання: задані конструктором геометричні параметри (форму та розміри) із необхідною точністю та необхідні фізико-механічні властивості поверхні. Геометричні параметри досягаються, в основному операціями механічного оброблення. Що стосується фізико-механічних властивостей, то їх можна сформулювати різними способами.

Для фінішної обробки розглядуваних поверхонь ріжучим інструментом використовують операції тонкого точіння, розточування, розвертування, шліфування, хонінгування та інші.

До таких способів відносять методи поверхневого пластичного деформування, методи термічної, хімічної та хіміко-термічної обробки.

Класичним варіантом для деталей класу «тіла обертання» із зовнішніми робочими поверхнями у технологічному процесі виготовлення з метою зміцнення робочих поверхонь є гартування струмом високої частоти (СВЧ) з наступним шліфуванням абразивним інструментом. Крім переваг високої продуктивності обробки - шліфування загартованих сталей володіє і деякими недоліками. Застосування абразивних кіл, призводить до виникнення високих температур в зоні обробки, а структура загартованої сталі, при шліфуванні може виходити з рівноважного стану під дією навіть короткочасних теплових імпульсів. Шліфування загартованих сталей супроводжується іноді трьома характерними варіантами зміни стану поверхневого шару при переважанні теплового фактору над деформаційним: відпуск мартенситу; повторне гартування і відпустку повторно загартованого поверхневого шару. Така зміна твердості зміцненого шару викликає значні градієнти залишкових напружень, який може бути причиною виникнення мікротріщин в процесі обробки або

осередком руйнування деталі в процесі експлуатації.

При аналізі виборі методів обробки внутрішніх циліндричних поверхонь крім якісних параметрів процесу слід також оцінювати і його собівартість. Як видно із діаграми (рис. 1.4) при розкатуванні одержують таку ж величину мікронерівностей поверхневого шару як і при хонінгуванні, поліруванні та притирці, при цьому вартість цього методу в 4 рази дешевша.

Другим великим недоліком, який виникає при використанні термічної обробки є втрата точності розмірів оброблювано поверхні. Такий ефект пояснюється нерівномірним охолодженням поверхні деталі і її серцевини, внаслідок чого виникають залишкові напруження, які і спричиняють втрату точності форми та розмірів деталі. Особливо сильно цей ефект проявляється при термічній обробці деталей з глибокими отворами. Гільза циліндра відноситься до класу таких деталей, оскільки довжини твірної отвору гільзи перевищує її діаметр у п'ять разів.

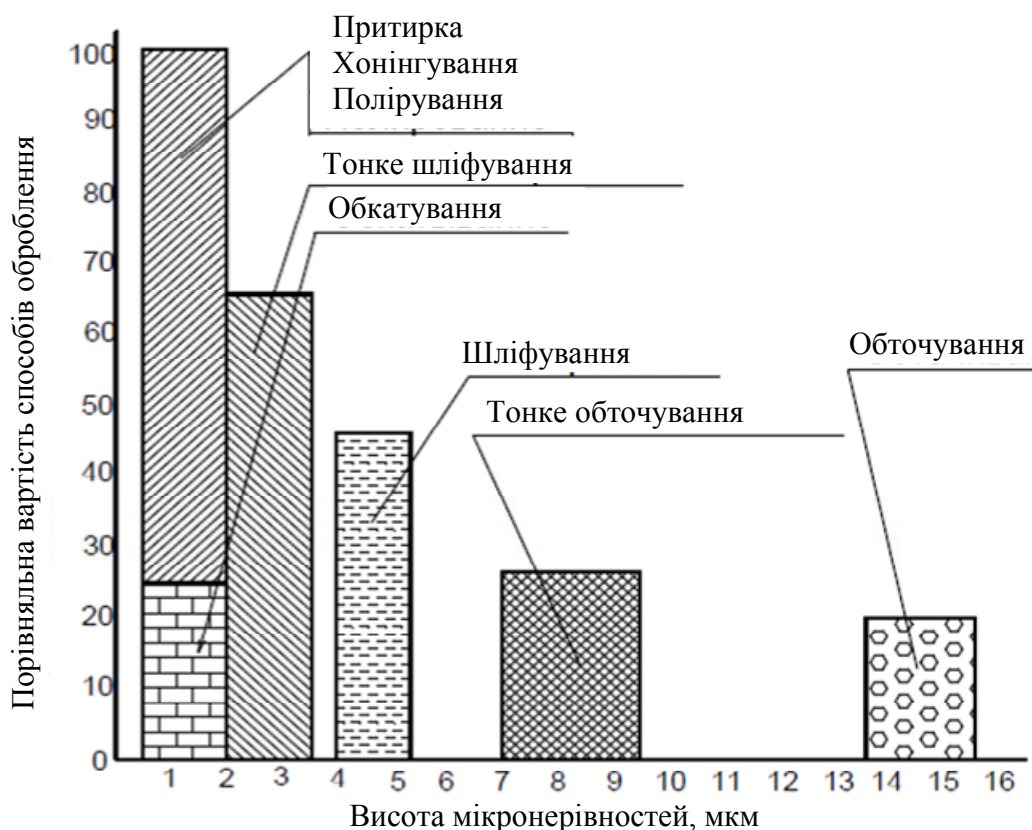


Рисунок 1.4 – Порівняльна діаграма різних методів чистової обробки і досягнутої при цьому шорсткості поверхні (по даних фірми «Hegenschiede») [22]

Тому для гільз циліндрів оптимальним буде використання поверхневого пластичного деформування в якості фінішної операції технологічного процесу із подальшим поліруванням пастами або притиранням.

Такі методи забезпечують високу продуктивність, точність форми та розмірів, високий ступінь механізації та автоматизації.

Класифікацію довгомірних виробів в у своїй роботі Кусий Я.М. [185]. В даній класифікації найбільш повно описано всі категорії довгомірних заготовок з циліндричними поверхнями.

Методи обробки деталей ППД відрізняються простотою реалізації і високою ефективністю, є деформаційні методи - обробка поверхневим пластичним деформуванням (ППД). ППД застосовують на фінішних операціях технологічного процесу, замість або після термообробки, і часто замість абразивної або оздоблювальної обробки.

Обробка ППД заснована на пластичній деформації тонкого поверхневого шару, і в порівнянні з обробкою точінням, шліфуванням, поліруванням, має ряд переваг, зокрема: зберігається цілість волокон металу і утворюється дрібнозерниста структура в поверхневому шарі; відсутнє шаржування оброблюваної поверхні частинками шліфувальних кругів, полірувальних паст; відсутні термічні дефекти; стабільні процеси обробки, які забезпечують стабільну якість поверхні; можна досягати мінімального параметра шорсткості поверхні (R_a 0.1 ... 0,05 мкм і менше) як на термічно необроблених сталях, кольорових сплавах, так і на високоміцних матеріалах, зберігаючи початкову форму заготовок; можна зменшити шорсткість поверхні в кілька разів за один робочий хід; створюється сприятлива форма мікронерівностей з більшою опорної площею; можна утворювати регулярні мікрорельєфу із заданою площею поглиблень для затримання мастильного матеріалу; створюються сприятливі стискаючі залишкові напруги в поверхневому шарі; плавно і стабільно підвищується мікротвердість поверхні.

Способи зміцнюючої обробки детально розглянуті в роботах [57, 84, 88,

151, 185, 191, 238, 242, 246, 261, 269]. В роботах Личковаха А.С. [192] наведено класифікацію способів поверхневого пластичного деформування внутрішніх циліндричних поверхонь (рис. 1.5).

В останні роки широкого поширення набули технології віброоброблення. Використання вібротехнологій в різних галузях машинобудівного виробництва описано в роботі И.Я. Бараца [88]. Суть використання вібротехнологій в машинобудуванні полягає у накладанні ультразвукових коливань на інструмент чи технологічне оснащення з закріпленою в ньому деталі, що значно покращує якість обробленої поверхні та її фізико-механічні властивості, а також зменшує час на обробку. Такий метод обробки був запропонований Японським дослідником Д. Кумабе [183] ще у 1985 році.

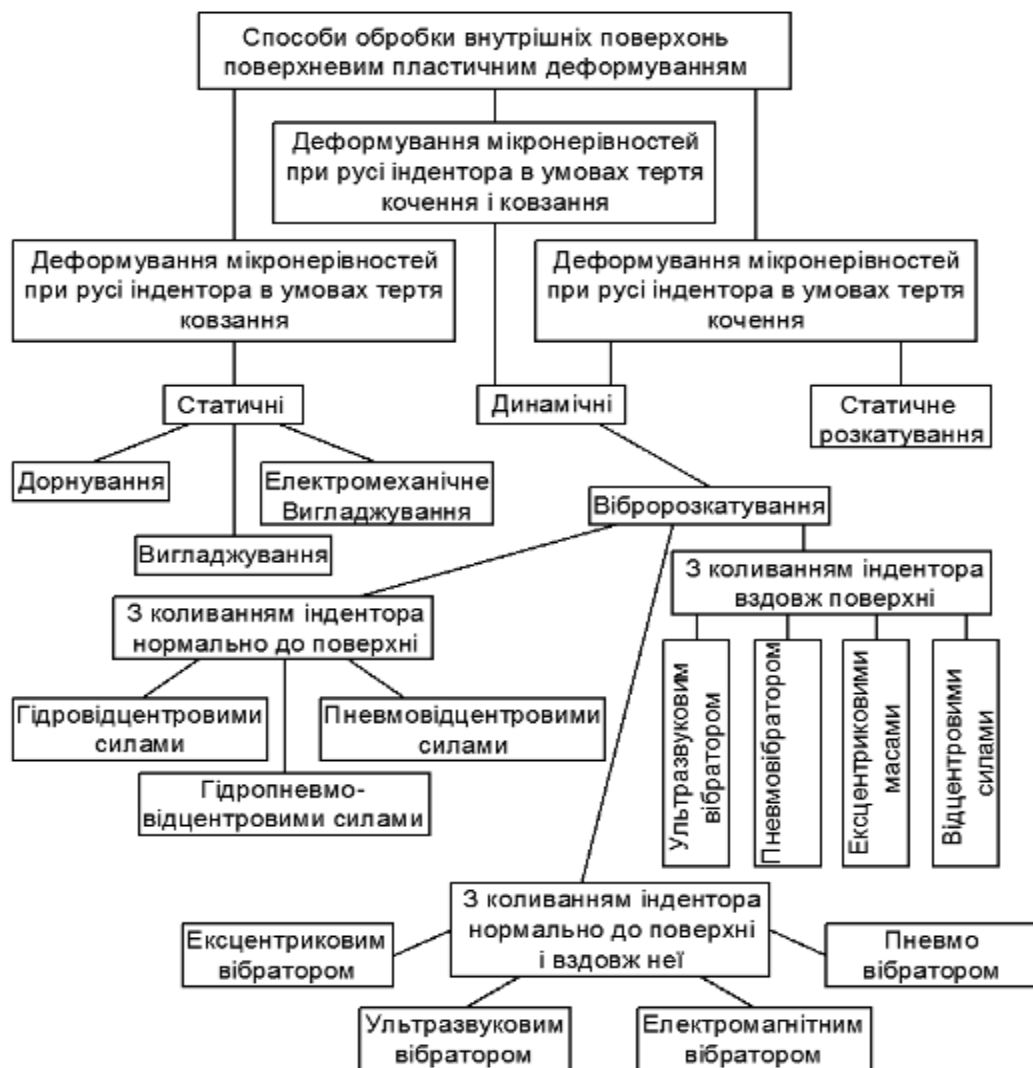


Рисунок 1.5 – Класифікація способів поверхневого пластичного деформування внутрішніх циліндричних поверхонь [192]

Значною перевагою вібронакатування є значне скорочення часу припрацювання та зменшення зношування, що супроводжує цей процес. Дослідженнями [266] встановлено залежність часу припрацювання і величини зношування від способу обробки поверхонь (рис. 1.6).

Особливістю цього дослідження є те, що автор звертає увагу на радіуси заокруглень вершин виступів мікрорельєфу, які утворюються при наведених видах обробки. Наприклад при шліфуванні цей радіус становить 16 мм, токарній обробці – 100 мкм, при обкатуванні – 800 мкм і 4300 мкм при вібронакатуванні. Саме малі значення цих радіусів і є причиною пікових значень питомих тисків, які призводять до підвищення температури в зоні тертя. Тому поверхня оброблена вібронакатуванням має суттєві переваги перед поверхнями обробленими іншими видами обробки.

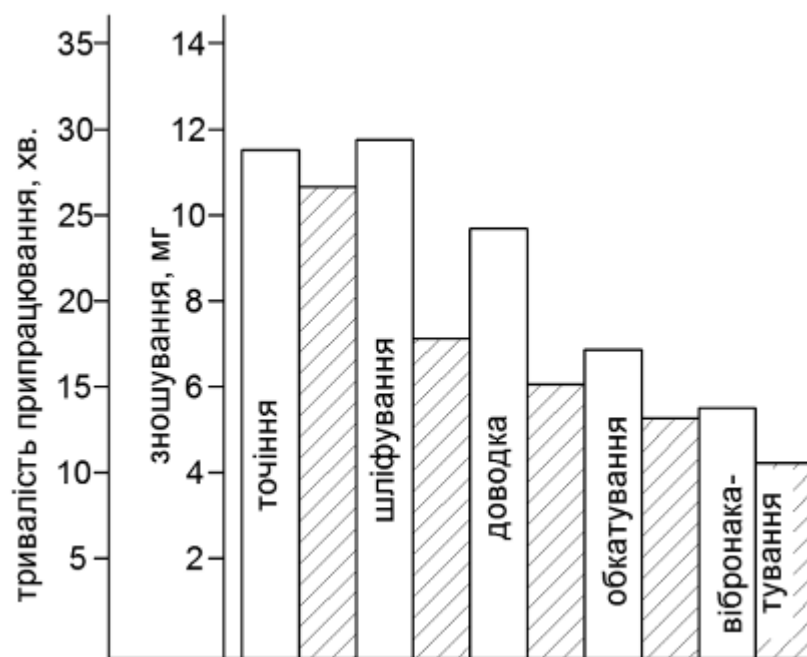


Рисунок 1.6 – Залежність часу припрацювання і величини зношування від способу обробки поверхонь [269]

Переваги обробки внутрішніх поверхонь вібронакатуванням очевидні і описані в технічній літературі багато разів [84, 87, 88, 130, 148, 188, 199, 242, 185].

В роботі [185] описано переваги обробки методами ППД поверхонь із сталі 45, сталі 20ХС та сталі 35. Встановлено, що ступінь наклепу при

використанні вібраційно-відцентрового методу обробки становить: для сталі 35 – 52 %; для сталі 45 – 40 %, для сталі 20ХС – 24 %, проте час оброблення сталі 35 значно більший від часу оброблення інших матеріалів.

В роботі [191] вказано, що обробка вібронакатуванням дозволяє покращити якісні параметри обробленої поверхні на 60-63% для бронзи, 21- 53: - для сталі і 42-60% для дюралюмінію. Ці дані залежать від рівня пластичності матеріалу.

Вибір матеріалу залежить від твердості обробленої поверхні для оброблення деталей із матеріалів високої твердості (від HRC 50 до HRC 60) використовують алмазні наконечники. Сила тиску інструменту при вигладжуванні становить 50-200 Н, що дозволяє обробити поверхні із невеликою жорсткістю і поверхні з нерівномірною жорсткістю, а також канавки шириною 5-10 мм. При віброобкатуванні сила підтискання інструмента становить 800-1000 Н. При віброобкатуванні і вібровигладжуванні інструмент витискає синусоїдальну канавку.

Вирівнювання форм, розмірів і розташування мікронерівностей на поверхні досягається зміною режимів оброблення. Мікротвердість поверхні канавок і вплив на 10-25 % вище твердості вихідної поверхні. Залишкові напруження в 1,3-1,7 рази більше ніж при обкатуванні без накладання вібрацій на аналогічних режимах.

Було також розроблено метод вібраційно-відцентрового зміцнювального оброблення (ВВЗ) для технологічного забезпечення параметрів якості деталей машин та механізмів. Головна відмінність методу ВВЗ від інших методів ППД, в яких зусилля деформування обмежене масою одиничного деформуючого елемента – кульки чи ролика, полягає в тому, що в кожен проміжок часу контактування оброблюваної деталі із виконавчим органом пристрою відбувається з ударом через незначну кількість кульок, розташованих вздовж твірних оброблюваної поверхні деталі, причому тілами, що співударяються, є масивні (порівняно з масою кульки чи ролика) деталь і виконавчий орган зміцнювального пристрою. Використання зміцнювальних пристроїв із

дисбалансним приводом для викінчувально-оздоблювального оброблення за допомогою методу ППД дозволило розв'язати важливі проблеми технології виготовлення довгомірних стержневих виробів - оброблення їх внутрішніх поверхонь та сумісне оброблення внутрішніх та зовнішніх поверхонь довгомірних циліндричних деталей, що підвищило продуктивність праці. Більш перспективні зміцнювальні пристрої із електромагнітним приводом, що працюють згідно методу ВВЗ. Однак відомі конструкції таких пристроїв обкатного типу. Закріплення деформуючих елементів безпосередньо до складників електромагнітного приводу та відсутність налагодження пристрою на близький до резонансного режим оброблення змушувало використовувати енергоємні та потужні електромагніти для накопичення необхідної енергії деформування. На жаль, ефективних конструкцій електромагнітних пристроїв резонансного типу із автономним регулюванням окремих електромагнітів та механізмом підсилення виконавчих органів створено не було.

Отже, в результаті проведеного аналізу технологічних методів та засобів забезпечення якісних параметрів поверхонь деталей класу «тіла обертання» встановлено, що існуючі технологічні методи забезпечення параметрів якості задовільняють умови сучасного виробництва. Однак, відсутність комплексного підходу до забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання», неврахування явища технологічної спадковості та взаємного впливу параметрів якості між собою не забезпечує належних експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання».

1.3 Методи формування регулярного мікрорельєфу на поверхнях деталей класу «тіла обертання».

Зростаючі вимоги до експлуатаційних характеристик машин і механізмів обумовлюють необхідність постійного поліпшення експлуатаційних властивостей їхніх деталей. Вирішення цього завдання пов'язане зі створенням нових більш сучасних конструкцій машин, застосуванням для їх виготовлення

більш міцних металів і матеріалів, удосконалюванням і розробкою нових прогресивних технологій виготовлення деталей, підвищенням якості фінішної обробки їхніх робочих поверхонь, от стану яких значно залежать їхні експлуатаційні властивості.

Параметри регулярного мікрорельєфу регламентуються ГОСТ24773-81 [109]. Відповідно до цього документу розрізняють частково-регулярний мікрорельєф (ЧРМР) і повністю новий регулярний мікрорельєф (ПНРМР). Поверхні з ЧРМР характеризуються видом і випуклою або увігнутою формою канавок (рис. 1.7).

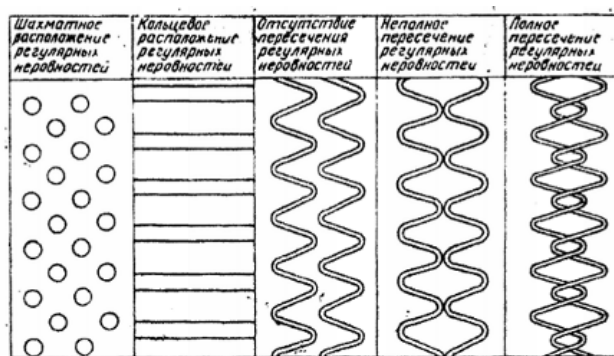


Рисунок 1.7 – Види частково регулярних мікрорельєфів (ГОСТ 24773-81) [109]

Офіційною є класифікація регулярних мікрорельєфів, яка наведена у стандарті ГОСТ 24773-81 [109], де поверхні з регулярними мікрорельєфами поділяються на класи, групи, види і типи (рис. 1.8).

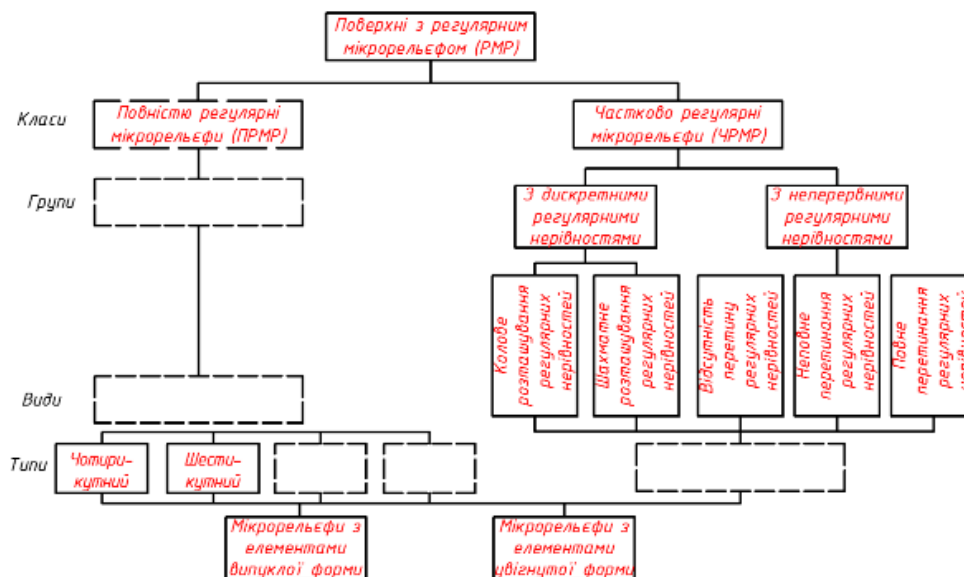


Рисунок 1.8 – Класифікація регулярних мікрорельєфів згідно ГОСТ 24733-81 [109]

Однак існують і інші класифікації регулярних мікрорельєфів, які відображають особливості їх форми та взаємного розміщення, зокрема класифікація розроблена Шнейдером Ю.Г. [269] (рис.1.9).

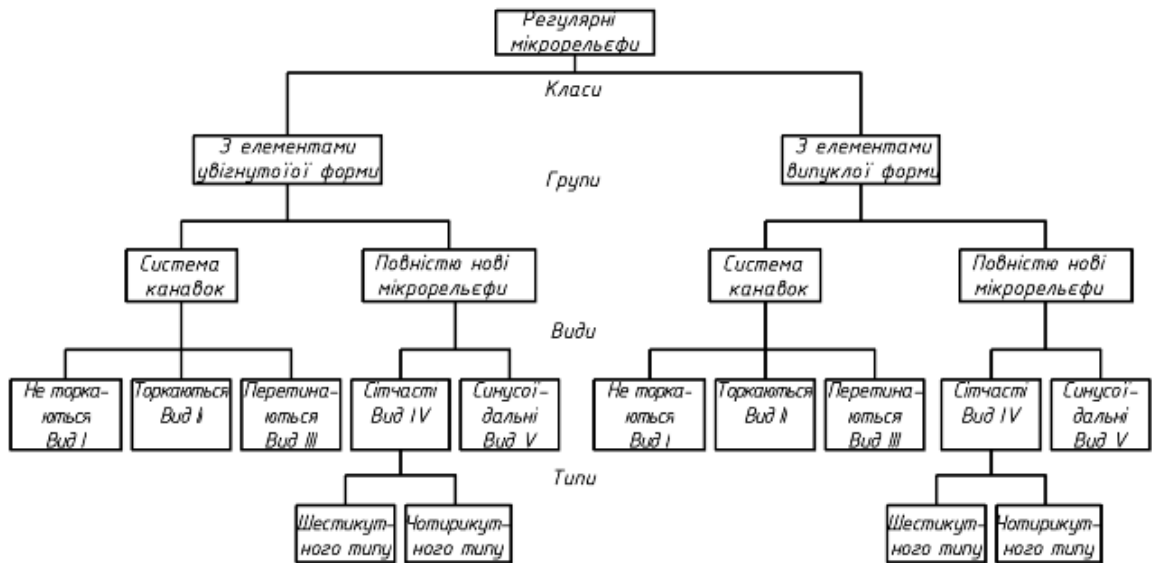


Рисунок 1.9 – Класифікація регулярних мікрорельєфів за Шнейдером Ю.Г.

Однією із таких є класифікація мікрорельєфів наведена на рис. 1.10. Фактично ця класифікація не суперечать тій, яка наведена у стандарті [109], а лише ширше розкриває їх особливості.

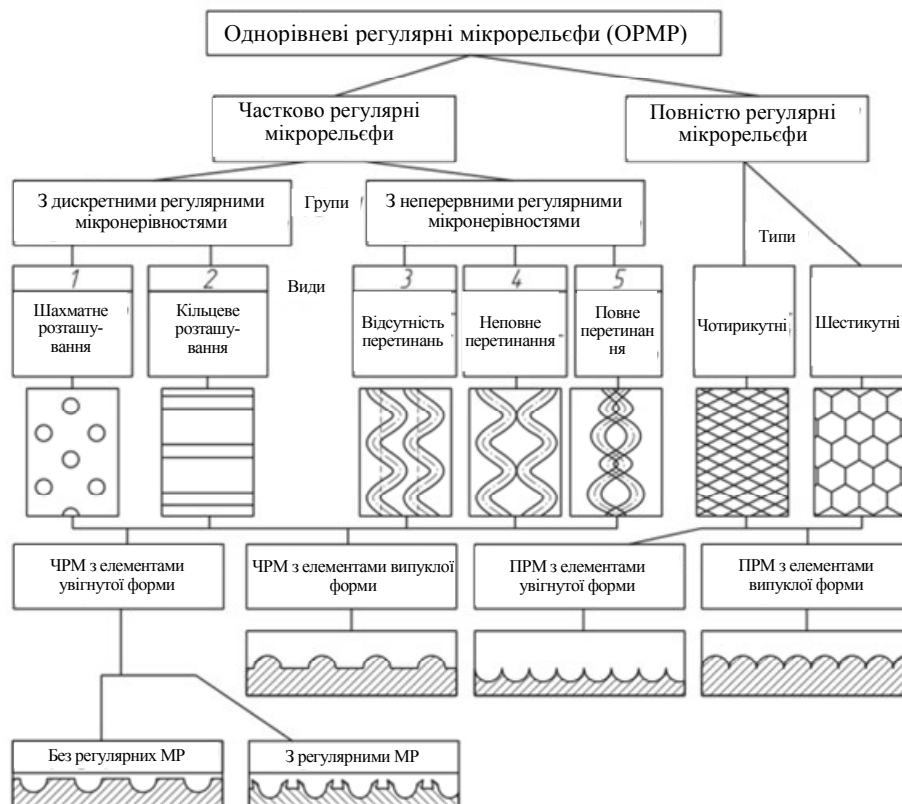


Рисунок 1.10 – Класифікація регулярних мікрорельєфів [30]

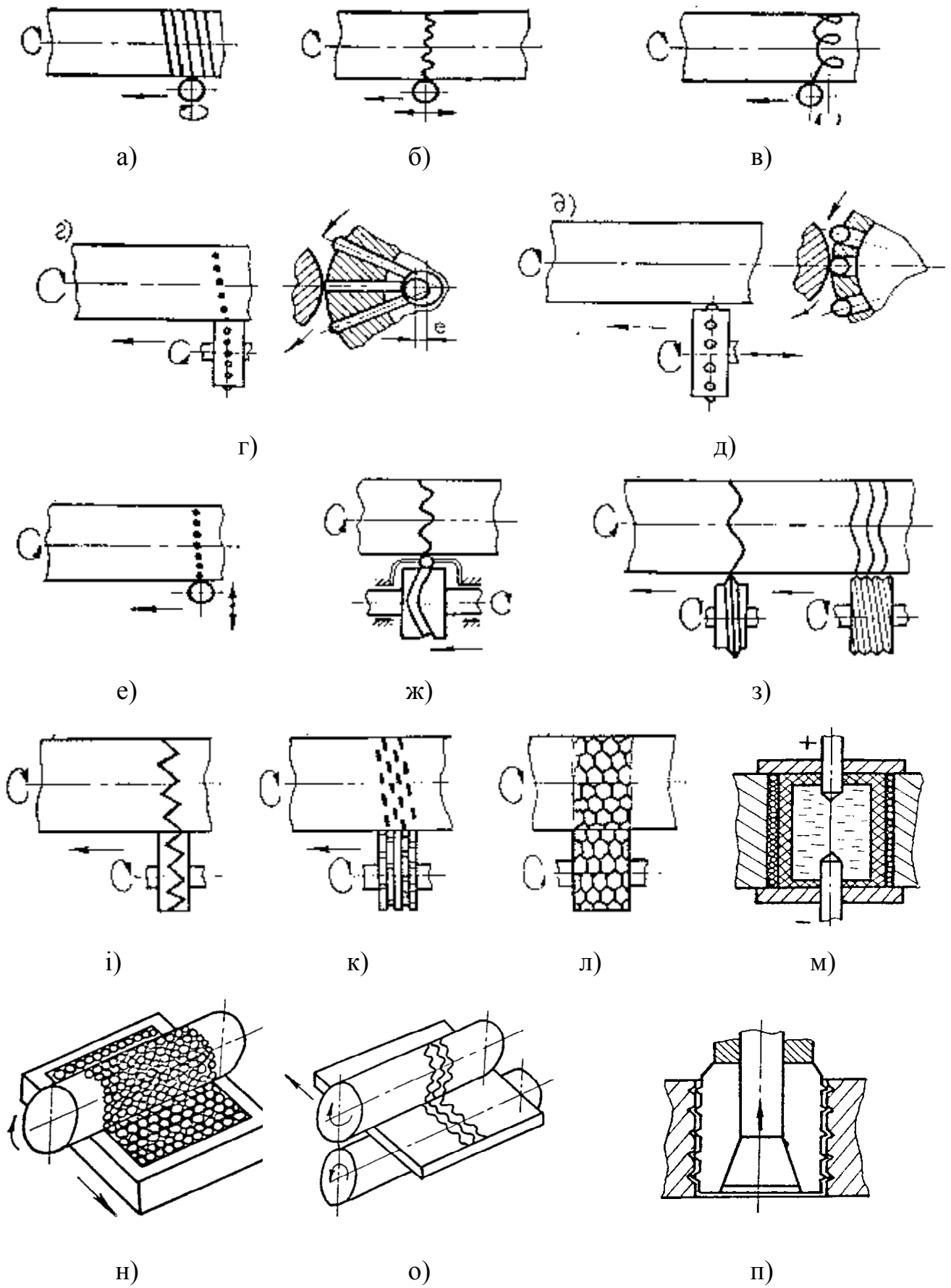


Рисунок 1.11 – Методи утворення регулярних мікрорельєфів

Значного поширення в попередні десятиліття набувати методи безвібраційного утворення мікрорельєфів. Ці способи засновані на копіюванні мікроструктури, створеної на поверхні копіра. Сучасні методи 3D друку дозволять значно зменшити вартість виготовлення таких інструментів (рис.1.11 з,і,к,л). По першій схемі мікрорельєф видавлюється на вузькій ділянці поверхні деталі, не більше ширини ролика. За схемою на прохід можна обробляти поверхні практично необмеженої довжини.

Суттєвою перевагою цих методів є висока продуктивність та простота конструкції інструмента для формування РМР. Недоліком таких методів як виявилось раніше є значна величини релаксації, яка пов'язана із малою швидкістю деформування матеріалу. Це призводить до того, що розміри і форма мікрорельєфу на ролику і на відтвореній заготовці мають суттєві відмінності.

Однак їм властиві й істотні недоліки: досить складний у виготовленні, дорогий інструмент; із – за великої площі контакту із заготовкою для видавлювання мікрорельєфу порівняно малої глибини (10–12 мкм) потрібне прикладення значних зусиль, що неприпустимо при обробці мало- і деталей із середньою жорсткістю; відносно невисока зносостійкість роликів; обробка термічно зміцнених деталей практично неможлива. Через це область рентабельного застосування даних методів обмежується головним чином серійним і крупносерійним виробництвами.

Подальше дослідження без вібраційних методів регуляризації мікрорельєфу дали поштовх розвитку нової, досить перспективної технології - прокатки у вібронакатанних валках (рис.1.11,о) або над плоскими рельєфними штампами (рис. 1.11,н) з утворенням на поверхнях деталей "зворотного" мікрорельєфу. Наприклад, з листів, з отриманим таким методом регулярним мікрорельєфом, виготовляють багато деталей не потребуючої наступної оздоблювальної обробки - зачищення, полірування. Контактна жорсткість листів з регулярним мікрорельєфом підвищується на 25-30 %, а втомлювана міцність на 15-20 %.

Однак, перераховані вище методи засновані на послідовному формуванні регулярного мікрорельєфу на поверхні деталі, що позначається на їхній продуктивності. Доцільним у зв'язку з цим є застосування методів, що дозволяють наносити регулярний мікрорельєф на всій оброблюваній поверхні одночасно. Для здійснення цих методів необхідні джерела енергії більшої потужності.

Одним з основних наукових підходів підвищення зносостійкості поверхонь тертя є формування регулярного мікрорельєфу – це особливої структури сформованої на поверхні робочих елементів деталей машин для забезпечення наступних переваг [8, 86, 147, 153, 158, 188, 191, 252, 269]:

- більшого опору схоплюванню як з мастилом так і без нього;
- більшої маслоємності поверхні;
- значно меншого періоду припрацювання або його відсутності;
- зменшення коефіцієнта тертя спряжених деталей;
- вищої зносостійкості.

Параметри шорсткості поверхні зразків і деталей, глибина h і ширина b й канавки або мікро відбитка визначаються профілограмуванням на профілографі – профілометрі мод. 201. Однак цей спосіб не практичний для виробничих умов і має досить високу похибку.

Шнейдером Ю.Г. [269] було доведено високу ефективність способу утворення регулярного мікрорельєфу вібраційним накатуванням. Регулярні мікрорельєфи утворенні способом вібронакатування володіють однорідністю всіх геометричних параметрів, які чітко пов'язані з режимами обробки [265].

Слід відмітити, що для різних типів спряжень оптимальними будуть мікрорельєфи із різними геометричними параметрами [269] рис.1.13.

Зносостійкість гільз з регулярним мікрорельєфом підвищується 1,5-1,7 разів порівняно з гільзами обробленими хонінгуванням. Це пояснюється утворенням мікрорельєфу з вищою несучою здатністю і масло ємністю поверхонь тертя.

Як показали дослідження [268] із збільшенням площі канавки F_k (рис.

1.13) зношування гільзи спочатку зменшується, а потім знову зростає. Цей факт пояснюється зменшенням площі опорної поверхні і, відповідно, зростанням питомих тисків і зношування поверхні гільзи.

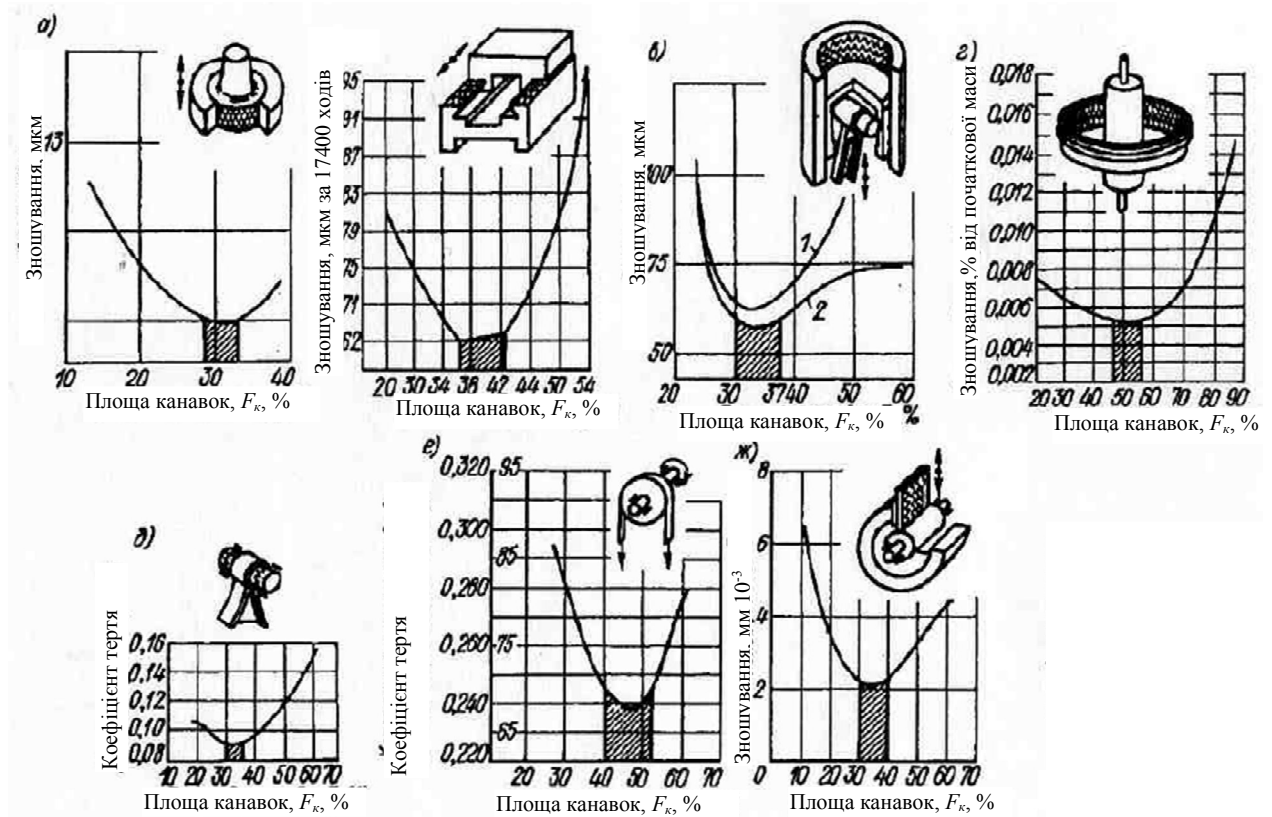


Рисунок 1.12 – Оптимальні параметри регулярних мікрорельєфів та графіки зношування спряжених поверхонь [269]

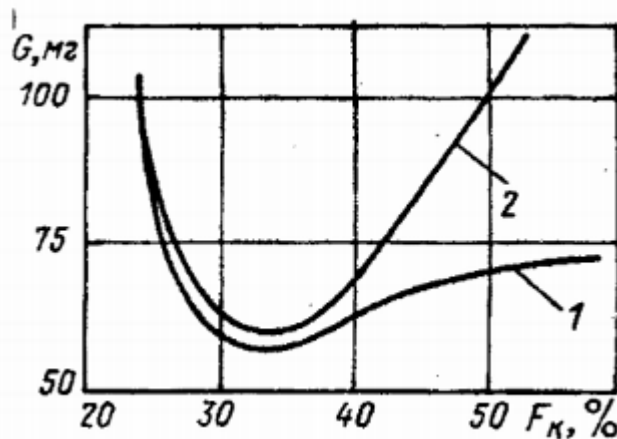


Рисунок 1.13 – Залежність зносостійкості гільзи (крива 1) і поршневого кільця (крива 2) від площі масляних канавок F_k на поверхні гільзи [268]

Зокрема в роботі [192] встановлено, що найкращим мікрорельєфом для гільз

циліндрів двигунів внутрішнього згорання виявився мікрорельєф II виду по ГОСТ 24773 - 81 (з стосуються канавками і площею, займаної канавками, 40 - 50%).

При терті з змащуванням, основними характеристиками мікрорельєфу, що визначають умови припрацювання є несуча здатність і маслоємність. Методику визначення оптимального мікрорельєфу при віброканатуванні було розроблено Шнейдером Ю.Г. [269]. Суть методики полягає у тому, що на зразках утворювався регулярний мікрорельєф чотирьох видів з площею канавок F_k для перших трьох 25-30%, а для четвертого – з висотою нерівностей передбачених кресленням. На дослідному стенді визначали найкращий для даних експлуатаційних умов мікрорельєф. Після цього оброблялась наступна партія зразків з мікрорельєфом оптимального виду з площею канавок F_k рівною 30, 40, 50 і 60% і визначали оптимальну маслоємність поверхні.

Оптимальним за умови припрацювання виявився мікрорельєф I виду з площею канавок $F_k = 30-35\%$ від всієї обробленої вібронакатуванням площі [192]. Дослідження, що проводились Дворяновим Ю.С. на деталях поршневої пари дизельного двигуна Д-60К показали, що оптимальною є площа канавок $F_k = 32,7\%$. Дослідження проводили на мікрорельєфі I типу з канавками, що не дотикаються. Причому зношування поверхні гільзи обробленої вібронакатуванням було в 2-4 рази меншим в порівнянні з гільзою обробленою хонінгуванням. Також було встановлено, що вібронакатування дозволяє замінити таку дорогу операцію як сульфідкування.

Шнейдером Ю.Г та Лебединським Г.Г. [267] проводились аналогічні дослідження на гільзах двигуна М-412. Оптимальним у відношенні зносостійкості виявився мікрорельєф I виду з площею канавок 44,8%. Нанесення такого мікрорельєфу привело до підвищення зносостійкості в 1,5-1,7 рази.

Іваненко В.С. проводив такі ж дослідження на гільзах двигунів ЗИЛ-130. Дані дослідження виявили оптимальним мікрорельєф I виду з площею канавок $F_k = 45\%$. Зносостійкість при цьому зростала в 1,5-2 рази [269]. Також дослідженнями Іваненко В.С. було встановлено значний вплив на

зносостійкість поверхонь гільз кута нахилу сітки і наявності напливів.

Слід відмітити, що у всіх випадках, незалежно від схем і режимів нанесення мікрорельєфу оптимальне значення площі канавок мікрорельєфу F_k лежало в межах 25-45%. При менших значеннях F_k утворюється недостатня масло ємність спряжених поверхонь, а при більших – значно зменшується їх несуча здатність.

В результаті досліджень оптимальних мікрорельєфів було встановлено [192] зношування зразків залежить не стільки від площі канавок скільки від кута їх нахилу. Також встановлено, що найбільшою зносостійкістю володіють втулки, внутрішня поверхня яких оброблена оброблювалась вібронакатуванням з площею канавок $F_k = 39,4\%$, кут нахилу канавок 44° , глибина канавки 0,13мм. Крім цього встановлено, що при однакових площах канавок вони можуть мати різні кути нахилу канавок. Однак такі поверхні будуть відрізнятись масло ємністю і, відповідно, зносостійкістю.

Отже проведений аналіз дозволив встановити, що для забезпечення зносостійкості та маслоємності робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» доцільно використовувати операції обкочування із формуванням регулярних мікрорельєфів. Цей напрям є досить дослідженим, проте математичних моделей, які описують динаміку процесу віброобкочування досі не створено. Встановлено також особливості процесу формування мікрорельєфів, створених на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» та відсутність математичних моделей для опису їх конструктивних особливостей. Відсутні також технологічні основи для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей поверхонь із такими мікрорельєфами.

1.4 Аналіз результатів досліджень забезпечення параметрів якості поверхонь деталей машин

1.4.1 Аналіз результатів досліджень забезпечення геометричних параметрів поверхонь деталей машин

Одним із головних показників якості циліндричних (зовнішніх і внутрішніх) поверхонь гідроциліндрів є точність їх форми у поперечних перерізах, яка визначається таким параметром як відхилення від круглості.

Нормування відхилень від круглості регламентовано відповідними стандартами, наприклад ГОСТ 24642-81, і полягає в обмеженні їх допусками [101]. Відхилення від круглості [101, 107] визначаються як максимальні відхилення реальних профілів від вписаного у круглограму кола для внутрішніх циліндричних поверхонь і описаного кола навколо кругло грами – для зовнішніх циліндричних поверхонь.

Таке подання точності форми з точки зору інформативності є недостатнім і не може бути використано для виявлення і аналізу причини, які впливають на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь.

Ще одним критерієм якості циліндричної поверхні є хвилястість. Цей параметрів як проміжна ланка між макрогеометричними та мікрогеометричними параметрами поверхні. Критерієм для визначення хвилястості є величина відношення кроку до висоти нерівностей (рис.1.14). Для шорсткості це відношення орієнтовно рівне $l/H < 50$, для хвилястості – $L/H_B = 50 - 1000$, для макрогеометрії – $L/H_B > 1000$ [251].

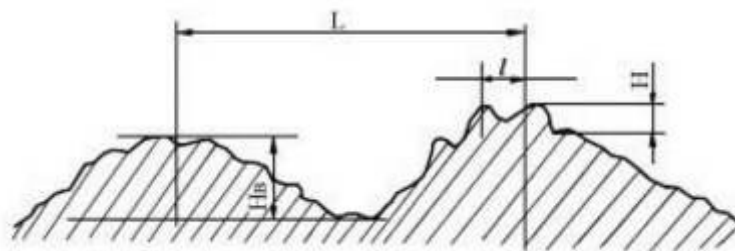


Рисунок 1.14 – Визначення хвилястості поверхні

В роботі [6] подані теоретичні залежності, які пов'язують шорсткість поверхні з елементами режиму різання, зокрема подачею. Такі моделі є неточними і їх удосконаленням шляхом введення додаткових параметрів у теперішній час займаються багато дослідників.

В роботі [41] запропонована поверхнева імітаційна модель для моделювання профілю поверхні отриманої точінням з відомими вібраційними характеристиками. Було встановлено, що радіально направлені вібрації впливають на величину шорсткості поверхні значно більше ніж тангенціально направлені або осьові вібрації.

Експериментами [120] також встановлено, що для кожних конкретних умов експлуатації потрібна своя раціональна шорсткість. Це пояснюється характером взаємодії спряжених поверхонь, зокрема напрямком їх відносного руху, його швидкістю, величиною зусилля, з яким взаємодіють поверхні, характером тертя між ними та багатьма іншими факторами. Узагальнено ці параметри зафіксовано наступним чином [102, 271].

Основоположниками теорії технологічної спадковості можна вважати професора Ящеріцина П.И. і професора Рижова Э.В.

Під терміном «технологічна спадковість» з врахуванням [272] будемо розуміти явище переносу форми, геометричних параметрів і властивостей оброблюваної поверхні від попередніх до наступних технологічних операцій, яке в подальшому відображається на експлуатаційних властивостях деталей машин.

Аналіз і оцінка існуючих технологічних процесів, які складаються із сукупності певної послідовності технологічних операцій надали можливість технологічну спадковість класифікувати на три види: позитивна – коли при виконанні в заданій послідовності технологічних операцій якісні параметри оброблюваних поверхонь покращуються; нульова – коли якісні параметри незмінні і негативна – коли якісні показники оброблюваної поверхні, отримані на наступній операції гірші ніж на попередній.

Одним із головних параметрів якості циліндричних (зовнішніх і внутрішніх) поверхонь гідроциліндрів є точність їх форми у поперечних перерізах, яка визначається таким параметром як відхилення від круглості.

Нормування відхилень від круглості регламентовано відповідними стандартами, наприклад ГОСТ 24642-81, і полягає в обмеженні їх допусками [101]. Відхилення від круглості [101] визначаються як максимальні відхилення реальних профілів від вписаного у круглограму кола для внутрішніх циліндричних поверхонь і описаного кола навколо кругло грами – для зовнішніх циліндричних поверхонь.

Таке подання точності форми з точки зору інформативності є недостатнім і не може бути використано для виявлення і аналізу причини, які впливають на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь.

Більш прогресивним у дослідженні точності форм поперечних перерізів циліндричних поверхонь є використання методу апроксимації відхилень радіуса-вектора реального профілю від номінального на проміжку $[0, 2\pi]$, як випадкової величини, тригонометричним рядом Фур'є [20, 140, 271]. Для оцінки точності форми циліндричних поверхонь використовують також метод Спрега [157], за яким відхилення від круглості приймають як відхилення радіуса-вектора реального профілю від усередненого номінального профілю. Основним недоліком цього методу є те, що перша гармоніка тригонометричного ряду Фур'є у спектрі гармонік відсутня, а величину ексцентриситету визначають як віддаль між двома центрами двох систем координат. Окрім цього при визначенні дисперсії розсіювання відхилень від круглості апроксимацією тригонометричним рядом Фур'є не враховується амплітуда першої гармоніки, що вносить значну похибку у значення дисперсії.

Аналіз існуючих методів оцінювання точності форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь показав, що таке оцінювання здійснюється, як правило, після фінішної операції технологічного процесу. Одним із пояснень такого стану є відсутність високопродуктивного імовірнісного методу оцінки впливу технологічної спадковості на точність форми поперечних перерізів

циліндричних поверхонь, на основі якого можна було б здійснювати корекцію технологічних операцій направлену на їх удосконалення і забезпечення високої якості обробки циліндричних.

Аналіз існуючих літературних джерел [7, 41, 49, 92, 99, 130, 156, 181, 196, 204, 246, 262] засвідчив, що багатьма вченими приділялась значна увага розробленню методів проведення досліджень щодо формування і прогнозування шорсткості поверхонь отриманих точінням. Разом з тим, в результаті аналізу літературних джерел встановлено, що на даний час не існує одностайної думки про характер впливу подачі на шорсткість, зокрема на параметр R_a .

Так у одній із першій наукових праць [156] присвяченій дослідженню впливу елементів різання, геометричних параметрів різця і величини його зношування на шорсткість показано, що збільшення подачі в діапазоні $0,07 \leq s \leq 0,26$ мм/об призводить до монотонного зростання такого параметра шорсткості, як максимальна висота нерівностей H_{max} , який, практично, згідно з [133] відповідає найбільшій висоті нерівностей R_z max . При цьому дослідження впливу s на H_{max} , здійснювали при глибині різання $0,5 \leq t \leq 1,0$ мм, яка рекомендується для напівчистового і чорнового оброблення. Окрім цього, не вказано конструктивних і геометричних параметрів інструментів, які використовувались при дослідженнях.

За даними Аршинова В.А. [80] при різанні без змащувально-охолоджувального середовища, збільшення подачі від $s=0,075$ мм/об до $s=0,21$ мм/об призводить до зростання значень R_a від 1,3 мкм до 2,7 мкм, причому ця залежність має лінійний характер.

Аналіз результатів впливу подачі s на такий параметр шорсткості як висота нерівностей профілю за десятьма точками R_z при точінні сталі ЭИ 107 різцем з $\gamma=15^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi'=20^\circ$, $r=1,75$ мм за даними Ісаєва А.І. [142] показує степеневу залежність R_z від s . Інтенсивність впливу s на R_z залежить від величини подачі. При точінні з подачею $s < 0,05$ мм/об вплив її на R_z послаблюється. Одночасно з цим, із розрахункових формул Ісаєва А.І. [142]

виходить, що залежність R_z від s – лінійна і описується функцією $R_z = k_{R_z} \cdot R_a$.

В роботі [258] відзначено, що із елементів режиму різання: t , s , V подача має найбільший вплив на шорсткість обробленої поверхні. Так при точінні сталі 45 із збільшенням швидкості різання з 42 м/хв до 84 м/хв (у два рази) висота нерівностей зменшилась в 1,5 рази, а при зменшенні подачі з 0,3 мм/об до 0,15 мм/об (у два рази) висота нерівностей зменшилась у 6 разів. Окрім цього, відмічено, що при обробленні вуглецевої сталі з подачами $s < 0,06$ мм/об не відбувається зменшення висоти нерівностей, що суперечить даним, поданим у роботах [7, 49, 204].

Аналіз емпіричних формул для визначення параметра шорсткості, які подані у [92, 246, 251] вказує на різні значення показника степеня y_{R_a} , який характеризує вплив s на R_a . Окрім цього в літературі [246] подано, що в залежності від оброблюваного матеріалу y_{R_a} може змінюватись в межах $0,54 < y_{R_a} < 1,1$.

В науковій літературі дослідженню шорсткості поверхні отриманої під час механічної обробки внутрішніх циліндричних робочих поверхонь присвячено роботи багатьох дослідників. Зокрема в роботі [99] проаналізовано параметри шорсткості та наведено статистичні методи оцінки її параметрів.

Комплексний аналіз методів прогнозування параметрів шорсткості проведено Добротворским С. С. в роботі [130].

Аналіз шорсткості поверхні за результатами аналізу профілограм отриманих при проточуванні циліндричних зразків із сталі 1Cr18Ni9Ti здійснено в роботі [48]. Авторами були отримані профілограми в десяти перерізах дослідних зразка, а також побудовані поверхні залежності шорсткості поверхні від швидкості різання, подачі та глибини різання.

Детальніше дослідження впливу геометричних параметрів ріжучої частини інструмента і твердості матеріалу заготовки на якість поверхні і сили різання при чистовому точінні подано у роботі [63].

Глибоке дослідження впливу коливань ріжучого інструмента на

формування шорсткості поверхні в процесі сухого точіння висвітлено в роботі [9]. Досліджувались шість параметрів, зокрема: матеріал заготовки та довжина ріжучого інструмента. Дисперсійний аналіз і аналіз взаємодії експериментальних даних показав, що подача і радіус округлення вершини різця є найбільш впливовими параметрами. Менша шорсткість була отримана при високошвидкісній обробці з малими подачами і великими радіусами округлень на вершині різця.

Здійснений аналіз вищеподаних літературних джерел показав, що на даний час існує два погляди про характер впливу s на R_a : за одним ця залежність монотонно зростаюча, за іншим – збільшення подачі від малих значень подач ($s > 0,02$ мм/об) спричиняє зменшення шорсткості до певного мінімального значення, а подальше збільшення s – до її зростання.

Аналіз значної кількості публікацій, де описані результати досліджень впливу s на параметр шорсткості R_a не виявив повторюваності експериментів, що може свідчити про детерміністський підхід при здійсненні таких досліджень.

Враховуючи те, що на процес формування параметра R_a одночасно діє значна кількість факторів [246, 196], які за своєю природою є випадковими величинами, то можна прийняти гіпотезу про те, що і параметр R_a буде випадковою величиною.

Одним із комплексу параметрів шорсткості відповідно до [34] є середнє відхилення профілю R_a мікронерівностей.

Відзначено, що на даний час у літературі відсутні дані про вплив розміри і форму поперечного перерізу оброблюваної циліндричної поверхні на її шорсткість. У той же час доведено [164, 258] суттєвий вплив розмірів і форми поверхні на пластичну деформацію зрізаного шару і на складові сили різання.

Досліджено вплив параметрів технологічного процесу обробки на шорсткість поверхні утвореної в процесі обточування [41]. Подібні дослідження описано в роботі [43], де авторами визначено оптимальні режими оброблення для отримання поверхні з мінімальними параметрами шорсткості, а

також визначено вплив елементів режимів різання на параметри шорсткості.

На основі результатів роботи [23] проаналізовано вплив геометричних та конструктивних параметрів металорізального інструменту, зокрема радіусу вершини різця на шорсткість обробленої циліндричної поверхні сформованої точінням. На основі експериментальних даних відзначено, що радіус округлення кромки різця має істотний вплив на шорсткість оброблюваної поверхні та сили різання при точінні титанових сплавів А92024-Т351.

Разом з тим необхідно підкреслити, що на даний час в науковій літературі відсутні дані про дослідження впливу діаметра та форми поперечного перерізу оброблюваної циліндричної поверхні на її шорсткість.

Враховуючи вищевикладене, з високою ймовірністю можна стверджувати про суттєвість впливу діаметра поперечного перерізу оброблюваної циліндричної поверхні та її форми на параметр шорсткості.

Обробка отворів самоустановлювальними інструментами внаслідок великої їх жорсткості виключає чи суттєво знижує вплив факторів, які викликають похибку розміру, а саме: геометричні неточності верстата та пристосувань, похибки базування оброблюваної деталі та інструменту, податливість технологічної системи, нестабільність механічних властивостей оброблюваного матеріалу, тощо [181, 198, 155].

В роботі [94] розглянуто умови самовстановлюваності плаваючих різцевих блоків в комбінованому інструменті при обробленні отворів на трубозоточувальних верстатах. Інструмент із інструментальним блоком та пружними зв'язками, який забезпечує самовстановлення в перехідних процесах, дозволяє розглядати розточування отвору як неперервний процес, що дає можливість не зменшувати режими різання при обробленні отвору в процесі врізання інструменту зі сторони не перпендикулярного торця деталі, а також отримати високу якість обробленої поверхні без додаткового використання спеціальних інструментів, які використовують для отримання отворів високої точності [100].

Найбільш перспективним методом усунення неспіввісності осей

інструменту та заготовки при обробленні отворів є використання самовстановлювальних інструментів, з яких найбільш технологічними є плаваючі дволезові блоки [100].

Також в роботі [100] наведено умови збереження та втрати рівноваги при обробці отворів самоустановлювальними інструментами, зокрема розглянуто схеми дії сил, що діють на дволезовий інструмент при розточування отвору.

Визначенню оптимальних конструктивних параметрів самовстановлювальних інструментів присвячені роботи [197, 163]. Однак при аналізі літературних та патентних джерел не було виявлено технічних рішень, зокрема інструментів для розточування, які б дозволяють керувати точністю обробки внутрішніх циліндричних поверхонь при їх обробленні.

Для визначення висоти мікронерівностей рядом авторів отримані залежності, що пов'язують величини подач, радіус ролика, початкову висоту нерівності, питомий тиск, профільний радіус ролика, пружну деформацію. Так наприклад Папшевим Д. Д. [214] запропоновано наступну залежність для визначення висоти мікронерівності:

$$R_z = \frac{S_0^2}{8 \cdot R} \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k}\right) \cdot k_\xi \cdot k_p \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт, що характеризує збільшення радіуса матеріалу; k_ξ – коефіцієнт, що враховує пластичні властивості матеріалу; k_p – коефіцієнт, що враховує тиск на контактній площі.

В формулі Меньшакова В.И. враховується початкова висота мікронерівностей і фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу:

$$R_z = R_{z0} \cdot \left(1 - K_c \cdot K_M \cdot \lg \frac{P}{\lambda \cdot \beta \cdot F}\right) \quad (1.2)$$

де R_{z0} – початкова висота нерівностей; K_M – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні

властивості оброблюваного матеріалу; λ – коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу; F - площа контакту, яка розраховується за формулою:

$$R_z = 2,7 \sqrt{\frac{R_d \cdot R_{np} \cdot R}{R_d + R}} \cdot (\Delta h + \varepsilon + \sqrt{(\Delta h + \varepsilon) \cdot \varepsilon}) \quad (1.3)$$

де R_d – радіус оброблюваної деталі; R_{np} – профільний радіус ролика; e - величина пружної деформації; Δh – повна деформація в зоні контакту.

В розрахунковій формулі, запропонованій Браславским В.М. [95, 96] величина R_z пов'язана з величиною подачі і розмірами де формувального елемента:

$$R_z = R_{np} - \frac{\sqrt{4 \cdot R_{np}^2 + S_0^2}}{2} \quad (1.4)$$

де R_z - висота нерівностей по 10 точках; R_{np} - радіус профілю; S_0 - подача.

Більш складний зв'язок встановлений Барацем Я. И. [88]

$$R_z = R_{z0} \cdot (1 - K_c (104 - \sigma_T)) \cdot \lg \frac{P}{\lambda} \quad (1.5)$$

де R_{z0} – початкова висота нерівностей, K_c – коефіцієнт, що залежить від способу обробки; λ – коефіцієнт, що залежить від характеру розподілення напружень в осередку деіформації; σ_T - границя текучості, P - навантаження.

Особливе значення параметри шорсткості мають при обробленні поверхонь спряжених деталей. Шорсткість оброблених поверхонь чинить суттєвий вплив на експлуатаційні властивості поверхонь деталей машин.

Однак про відносність параметра шорсткості для оцінки якості поверхні можна зробити висновок проаналізувавши рисунок 1.15.

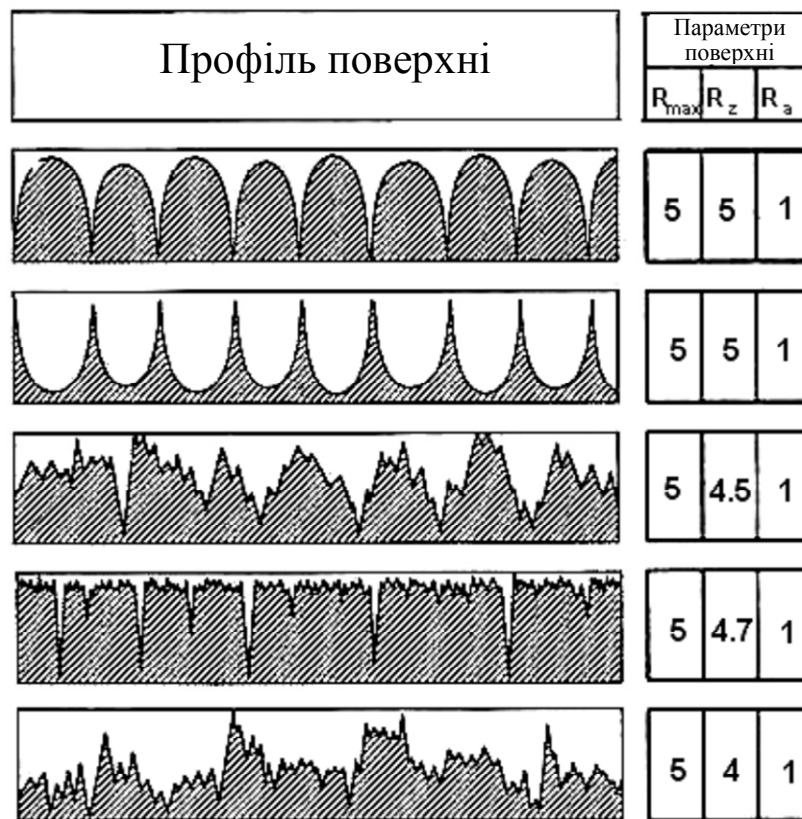


Рисунок 1.15 – Різні профілі поверхні з однаковим значенням параметра R_a [253].

На цьому рисунку зображено поверхні із однаковими числовими значеннями висотних характеристик параметра шорсткості. Однак цілком зрозуміло що кожна із цих поверхонь будуть мати різний опір зношуванню, який відобразить експлуатаційні властивості поверхні. Тому робити висновки про якість поверхні базуючись лише на параметрі шорсткості неправильно.

Останнім часом для оцінки експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин все частіше, особливо закордонні дослідники, використовують параметри кривої Аббота-Фаскрстоуна [10, 13, 26, 38, 40, 52,69] та R_k параметрів. Стандарт [32] також передбачає ці параметри як критерії оцінки якості поверхні.

Взаємозв'язок між експлуатаційними властивостями поверхні і параметрами шорсткості описаний в роботі [26], де оцінку експлуатаційних

властивостей поверхні проводять не за шорсткістю поверхні, а за допомогою параметрів кривої Аббота–Фаєрстоуна. Автори стверджують найважливіше значення мають три параметри цієї кривої, за якими можна оцінити експлуатаційні властивості поверхні, зокрема її опір зношуванню, це R_{pk} , R_k і R_{vk} .

Особливості оцінки стану поверхні за допомогою параметрів кривої Аббота–Фаєрстоуна описано також в роботі [38]. Встановлено, що функціональні властивості поверхні є у залежності від її фактичного стану, який залежить не лише від шорсткості поверхні, а і від її фізико-механічних її властивостей.

Тож встановлено наявність технологічних та геометричних параметрів, вплив яких на параметри якості поверхні може бути суттєвим. До таких параметрів належать форма та діаметр поверхні деталі класу «тіла обертання», стохастичність подачі верстату та інші. Розроблення методів врахування цього впливу та визначення ступеня цього впливу є актуальною задачею для машинобудівного виробництва.

1.4.2 Аналіз результатів досліджень формування фізико-механічних властивостей поверхонь деталей машин

Одним із методів підвищення якості внутрішніх циліндричних поверхонь (гідроциліндрів автомобільних кранів, гідроциліндрів механізмів керування муфтами щеплення, циліндрів підсилення механізмів повороту автомобілів, тощо) є поверхневе зміцнення шляхом формування на цих поверхнях регулярних мікрорельєфів.

Забезпечення зміцнення внутрішніх циліндричних поверхонь реалізується поверхневим пластичним деформуванням (ППД) з використанням спеціальних інструментів [58, 242, 252, 265]. Конструктивні параметри таких інструментів [5, 6] обумовлені певними особливостями, зокрема параметрами шорсткості і показниками регулярних мікрорельєфів [109].

Разом з тим у літературі [58, 106, 109, 116] недостатньо висвітлено

методи розрахунку конструктивних параметрів інструментів, які використовуються для формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях та не враховано взаємного впливу розрахункових параметрів.

Вперше математичні моделі регулярних мікрорельєфів (РМР) були описані Шнейдером Ю.Г. в роботі [269] де виведено умови формування РМР I-III видів, які стали основою для створення стандарту ГОСТ 24773-81 [109], який регламентує параметри регулярного мікрорельєфу сформованого на плоских і циліндричних поверхнях. Також ним були проведені і перші дослідження по створенню регулярних мікрорельєфів як оздоблювальної обробки на торцевих поверхнях тіл обертання ротаційним способом. В цій роботі також описані допущення які зроблені Я.С. Фельдманом і зазвичай приймаються при розробленні математичних моделей та розрахунку параметрів мікрорельєфу.

Слід відмітити, що всі математичні моделі, що описують РМР з канавками синусоїдальної форми будуються на основі рівняння гармонічного коливання у вигляді $y=A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$, де A – амплітуда коливань, ω – циклічна частота коливань, t – час, φ_0 – початкова фаза коливань і фактично дублюють одна одну.

В статті [205] наведено результати математичного моделювання процесу обробки зовнішньої циліндричної поверхні вала інструментом з алмазним наконечником, який формує на ній регулярний мікрорельєф, в залежності від режимів обробки. При цьому отримані результати моделювання поверхні обробленої деталі в процесі алмазного вигладжування з накладенням коливань. Порівнюючи результати моделювання з теоретичними результатами, зроблено висновок про працездатність математичної моделі.

В роботі [182] авторами запропонована технологія нанесення регулярного мікрорельєфу на плоскій поверхні за допомогою фрезерного верстату з ЧПК. Представлено рівняння залежності для руху центра інструменту в залежності від вхідних параметрів. Описана методика створення керуючої програми для

систем чисельного програмного управління Siemens і Fanuc з нанесення регулярного мікрорельєфу пластичним деформуванням на плоскі поверхні. Для візуалізації розробленого мікрорельєфу використаний симулятор WinNC, розроблений EMCО (Австрія).

За кордоном, в останнє десятиліття досить багато уваги приділено технології формування на робочих поверхнях відповідальних елементів деталей машин впорядкованого мікрорельєфу [1, 3, 24, 25, 44, 47, 50, 52, 57, 60, 62, 69].

Так в роботі [60] досліджено вплив розміщення регулярних мікронерівностей V-подібної форми, утворених на поверхнях торцевих поверхонь тіл обертання на коефіцієнт тертя таких поверхонь між собою як з використанням оливи L-AN-46 так і без неї. При цьому сила з якою поверхні притискалися одна до одної становила 20Н, а відносна швидкість обертання складала 0,4 м/с. Авторами встановлено, що розміщення елементів мікрорельєфу чинить значний вплив на коефіцієнт тертя. При цьому найнижчий коефіцієнт тертя було отримано при взаємодії торцевих поверхонь тіл обертання з мікрорельєфом з центральним кутом мікронерівностей 90° з орієнтацією до зовнішніх сторін торцевої поверхні.

Встановлення основних закономірностей впливу рельєфних утворень на механізми тертя та зношування та оптимізація технології формування регулярного рельєфу поверхонь тертя активно досліджуються за детермінованими та стохастичними підходами, а також прямими фізичними експериментами [45, 47]. Крім того, на даний час відомо значну кількість методів утворення регулярного рельєфу це й гаряче прокатування, штампування різних видів, лазерне текстурування. Ці методи забезпечують утворення заданої геометрії текстур, проте мають певні недоліки, зокрема складність відтворення рельєфу складної форми, необхідність складного обладнання.

Позитивний вплив пластичного деформування на циліндричні поверхні титанових сплавів Ti-6Al-4V описано в роботі [25]. Встановлено, що подача та швидкість обкатування є основними параметрами, які впливають на величину шорсткості сформованої поверхні. Крім цього зусилля деформування має

важливе значення для досягнення заданої твердості поверхні матеріалу. Вибір оптимальних режимів обробки забезпечив зменшення вихідної шорсткості на 77 % та підвищення твердості на 17%.

Крім цього в роботі [8], встановлено, що ці методи обробки збільшують корозійну стійкість та покращують структуру поверхні оброблюваного матеріалу. Дослідним зразком при цьому була плоска металева поверхні із матеріалу Mg Alloy AZ31.

Надто малі значення відносної площі вібронакатування $F_n < 35 \%$ призводять до недостатньої маслоємності поверхні, а занадто великі $F_n > 45 \%$ – до зменшення відносної опорної площі поверхні і, як наслідок, швидкого зношування спряжених поверхонь.

В роботі [44] було сформовано регулярні мікрорельєфи на зовнішніх циліндричних поверхнях зразків із сталей medium-carbon steel 1C45 and the low-carbon alloy steel 18CrMn4-4 яких було встановити вплив режимів оброблення на шорсткість та твердість поверхні. Одним із основних результатів досліджень є те, що авторами встановлений значний вплив амплітуди вібрацій, як найбільш визначального фактора на параметр шорсткості поверхні R_a .

Для проведення експериментальних досліджень [57], авторами розроблено технологію формування регулярного мікрорельєфу на різних типах поверхонь, зокрема плоскій, циліндричну та фасонну поверхні, використовуючи CNC оброблюючий центр HAAS VF-4 обладнаний подвійною віссю обертання, а також рухомим столом HAAS TR-110, а також використанням розробленого спеціального інструменту для віброобкочування [58].

В Україні дослідження проблеми покращення фізико-механічних властивостей робочих поверхонь деталей машин методами поверхневого пластичного деформування з застосуванням вібрацій здійснюються двома науковими школами – Львівською, яку очолює д.т.н., проф. Афтаназів І.С. до складу якої входять Я.М. Кусий, В.Г. Топільницький та Київською, яку очолює д.т.н., проф. Киричок П.О. до складу якої входять Зигуля С. М., Лотоцька О.І., Хмілярчук О. І. та інші.

В роботах Афтаназіва І.С. [81–87] розроблено метод вібраційно-відцентрового зміцнення оброблюваних поверхонь довгомірних циліндричних деталей за допомогою інструменту з електромагнітним приводом та пружними системами.

Автором отримано та проаналізовано емпіричні залежності для визначення основних динамічних характеристик методу вібраційно-відцентрового зміцнення. крім цього проведено енергетичний аналіз процесу вібраційного оброблення за допомогою зміцнювального пристрою з електромагнітним приводом та пружною системою.

В роботах Кусого Я.М. [188, 189] встановлено вплив технологічних параметрів при обробці інструменту з електромагнітним приводом на геометричні параметри якості поверхні та на основі проведених досліджень встановлено раціональні параметри оброблення.

В працях Киричка П.О. [151, 152, 153, 154] розроблені технологічні основи формування регулярних мікрорельєфів на деталях поліграфічного обладнання.

В роботі [148] автором запропоновано класифікацію пристроїв для оздоблювально-зміцнюючої обробки в залежності від приводу руху деформувального елемента інструмента, геометрії деталі і системи створення зусилля деформування.

Вихованцями наукової школи Киричка П.О. Хмілярчуком О. І. запропоновано інструмент для виконання віброобробки на деталях поліграфічного обладнання [261]. В роботах Лотоцької [194, 193, 195] запропоновано аналітичні залежності для визначення відносної площі частково-регулярних мікрорельєфів синусоїдального типу з відсутністю перетину регулярних нерівностей, а також запропоновано комплексна технологія формування мікрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин.

В літературі [269] під інструментом для віброобкатування розуміють державку для закріплення деформуючих елементів: кульок; алмазних і

твердосплавних наконечників, а у окремих випадках різців і самі де формуючі елементи. Для забезпечення ефективної роботи цих інструментів необхідно створити умову при якій матиме місце переважаюче тертя кочення між деформуючим елементом (кулькою) і оброблюваною поверхнею.

Ця умова виконується тоді, коли тертя між кулькою і оброблюваною поверхнею більше ніж тертя між кулькою і поверхнею, на яку вона опирається, тобто

$$F \cdot r_k > F_1 \cdot r_k + F_2 \cdot r_k \text{ або } F \cdot r_k > F_1 \cdot r_k + F'_2 \cdot r_k \quad (1.6)$$

де F – сила тертя між кулькою і оброблюваною поверхнею;

F_1 – сила тертя між кулькою і поверхнею опори;

F_1 і F'_2 – сила тертя між кулькою і боковими сторонами сепаратора;

r_k – радіус кульки.

Конструктивно ця умова реалізується шляхом встановлення деформувального елемента на кульковий підшипник, використання бронзових сепараторів і фторопластів як опорних поверхонь.

Згідно з [109] відносна площа регулярного мікрорельєфу (PMP) F_n – це виражене у відсотках відношення площі, що займають регулярні нерівності F_{gr} до площі поверхні деталі, яка оброблюється F_w . В роботі [269] вказано, що відносна площа поверхні F_n – це параметр частково регулярного мікрорельєфу, який найбільш повно характеризує практично всі експлуатаційні властивості поверхні і в першу чергу фактичну площу контакту однієї поверхні.

Отже відносна площа поверхні регулярного мікрорельєфу F_n – один з найважливіших його показників, який характеризує експлуатаційні властивості поверхні на якій він сформований. Оптимальне його значення коливається в межах 30-45% в залежності від умов експлуатації спряжених поверхонь [191, 192, 239, 256, 269].

Детально оптимальні значення відносної площі віброобкочування регулярного мікрорельєфу в залежності від умов експлуатації циліндричних

поверхонь деталей машин досліджені в роботі [191].

Такі значення відносної площі віброобкочування зумовлені оптимальним значенням відносної опорної довжини профілю t_p [34] – величини, яка визначається як відношення опорної довжини профілю до його базової довжини.

Канавки ЧРМ III виду в великим ступенем перекриття значно зменшують загальну площу мікрорельєфу і, відповідно, відносну площі віброобкочування.

Дослідження проведені науковцями в даному напрямі стосуються, в основному, визначення відносної площі віброобкочування та впливу на неї геометричних параметрів канавок та їх розміщення.

В роботі [57] розглянуто формування регулярного мікрорельєфу на профільних поверхнях із різними геометричними параметрами в залежності від умов формування. Авторами проведено повно факторний експеримент із чотирма змінними факторами: діаметр деформуючого елемента, зусилля деформування, амплітуда деформуючого елемента та кількість осциляцій. За результатами досліджень було побудовано гістограми Парето, які показують, що кількість осциляцій та амплітуда деформуючого елемента мають значний вплив на зміну форми комірок регулярного мікрорельєфу.

Авторами [62] представлені отримані результати експериментальної конструкції інструменту L8 Taguchi для формування регулярного мікрорельєфу на площинних поверхнях. Проведено визначення параметрів, що суттєво впливають на процес формування регулярного мікрорельєфу за допомогою фрезерного верстату з ЧПК на плоских поверхнях. Змінюючи режими оброблення було сформовано регулярні мікрорельєфи різні за розмірами та напрямком розташування канавок. При цьому було використано елемент режиму формування як подача.

В роботі [154] авторами розроблено алгоритм технологічного процесу формування геометричних параметрів частково-регулярного мікрорельєфу вібраційним обкочуванням на зовнішній циліндричній поверхні друкарського обладнання. Встановлено, що вплив технологічних факторів на зміну площі

поверхні з частково регулярним мікрорельєфом. Визначено межі та умови практичного варіації значень відносної площі поверхні з метою підвищення експлуатаційних властивостей деталей друкарського обладнання.

А в роботі [141] розроблено алгоритм керування технологічним процесом утворення мікрорельєфу на направляючих методом тонкого поверхневого пластичного деформування на плоских поверхнях деталей поліграфічного обладнання. Запропонована технологія дозволяє підвищити зносостійкість плоских направляючих і покращити позиціонування поліграфічної продукції при проходженні по поверхні мікронаправляючих поліграфічної продукції. Розроблений алгоритм враховує комплекс показників пов'язаних з матеріалом, геометричними і фізико-механічними параметрами поверхні плоскої направляючої, режимами поверхневого пластичного деформування.

Задача перекриття площі канавок розглянута в роботі [238]. Однак автором була розглянута канавка синусоїдального типу, яка апроксимувалась як сукупність прямолінійних ділянок. Такий спосіб апроксимації є досить неточним для визначення площі перекриття.

У літературі [240] поданий алгоритм, що дозволяє вибрати схему інструмента в залежності від показників якості поверхневого шару оброблюваної поверхні. Вихідними даними при цьому рекомендовано враховувати наступні параметри: вихідна твердість і шорсткість; технологічна спадковість (історія попереднього оброблення); фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу та його здатність до зміцнення.

Аналіз літературних джерел [148, 242, 252, 261, 265] показав, що на даний час відсутні залежності за якими би визначали конструктивні параметри інструмента для формування РМР, виходячи із можливості його складання, розміщення кульок певного діаметра по колу у корпусі, а також для визначення розмірів корпусу в залежності від діаметра деформуючого елемента – кульки і від діаметра оброблюваної поверхні.

Конструкції інструментів для оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь віброобкачуванням запропоновані в роботах [265, 242].

В літературі [269] подана конструкція трикулькової віброголовки, що складається з корпусу у якому встановлені деформуючі елементи - кульки, положення яких зафіксовано з одного боку сепаратором, а з другого боку конічною поверхнею конуса і цей конус підпружинений знизу вверх пружиною. До недоліків такої конструкції слід віднести складність, а іноді і неможливість використання його для формування регулярних мікрорельєфів у отворах невеликих діаметрів, у різних за фізико-механічними властивостями сплавах, відсутність залежностей для визначення конструктивних параметрів, що ускладнює процес проектування і виготовлення.

В роботі [238] обґрунтовано використання багатоккулькових головок для формування регулярних мікрорельєфів і запропоновано інструмент для формування РМР з розміщенням деформувальних елементів по колу. Однак при визначенні залежності між кількістю деформувальних елементів та подачею вказано, що для багато кулькових головок з кількістю кульок n , подача в n разів більша відстані між канавками, що не відповідає дійсності.

Також в усіх проаналізованих роботах не враховано вплив стохастичності подачі на процес формування регулярного мікрорельєфу, що призводить до спотворення регулярного мікрорельєфу на значній відстані.

Досить гостро стоїть проблема пружного відновлення розмірів після оброблення отворів методами ППД, або так звана релаксація матеріалу. За даними наведеними в різних джерелах величина пружного відновлення після дорнування отворів заготовок із м'яких матеріалів становить до 40% від натягу на дорнування при ППД. Такі значення пружного відновлення ускладнюють розрахунок точності отворів оброблених деталей і що важливо для фінішних операцій технологічних процесів.

Процес пружного відновлення досліджено в роботах [243, 244, 257], однак як вказано в роботі [143] вільне дорнування отворів (ППД) супроводжується пластичними і пружними деформаціями, в результаті яких змінюються розміри оброблених поверхонь (рис.1.16). Конусний дорн, який мав діаметр d_d і робочу забірну частину з кутом α_1 , проштовхують через отвір

заготовки d_0 з натягом дорнування i . Контакт дорна с заготовкою відбувався на ділянці довжиною l_k . Для визначення фактичного діаметра обробленого отвору d_1 необхідно знати радіус дуги згину стінки заготовки $R_{и}$, висоту хвилі неконтактної деформації $h_{в}$ і пружні зміщення внутрішньої поверхні після проходження інструменту $U_{упр}$. Пластичні деформації визначають кінцеві розміри заготовки, а пружні – точність оброблених отворів.

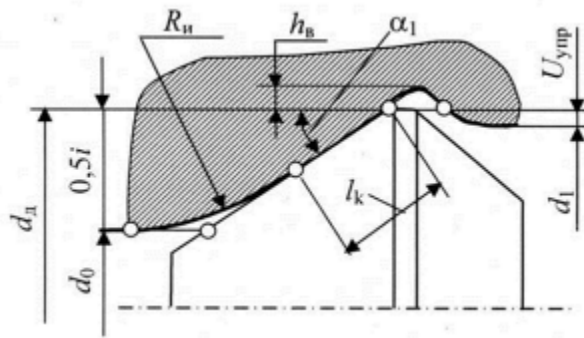


Рисунок. 1.16. Схема деформації пластичному деформуванні

Основними факторами, що впливають на величину пружного відновлення є початкові розміри поперечного сечення заготовки, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу, загальний натяг при пластичному деформуванні.

Взаємозв'язок геометричних параметрів інструменту, натягу дорнування та матеріалу з пружними деформаціями заготовки описується залежністю

$$2U_y \frac{E}{\sigma_s} \cdot \frac{1}{d_0} = f(m, \lambda) , \quad (1.7)$$

де $2U_y$ – пружне відновлення діаметра отвору після зняття навантаження (пружне зміщення); E , σ_s – модуль повздовжньої пружності і опір матеріалу пластичному деформуванню; d_0 – діаметр отвору заготовки; m – відносна товщина стінки труби, рівна відношенню її зовнішнього діаметра до внутрішнього; λ – відносний натяг дорнування, що визначається відношенням абсолютного натягу до діаметра отвору заготовки.

Кінцевий вирази розглядуваної задачі в різних авторів відрізняються

складом першої частини, тобто функціями $f(m, \lambda)$. При навантаженні труби рівномірним внутрішнім тиском перехід її поперечного перерізу в стан пластичності по Ляме-Гадоліну [257] відбувається в момент, коли

$$f(m, \lambda) = \frac{1 - \mu + (1 + \mu)m^2}{2m^2}, \quad (1.8)$$

де μ - коефіцієнт Пуасона матеріалу труби.

При дорнуванні з великими натягами в роботі [243] без врахування зміцнення права частина має вигляд

$$f(m, \lambda) = \frac{2}{3} \cdot \frac{2m^2 + 1}{m^2 - 1} \ln m. \quad (1.9)$$

Приведена в роботі [97] відповідна формула враховує зміни пружної деформації в процесі деформування через відносний натяг λ

$$f(m, \lambda) = \frac{4}{3} \cdot \frac{(m-1)\sqrt{1/(1+\lambda)}}{2+(m+1)\sqrt{1/(1+\lambda)}} \cdot \frac{2m^2+1}{m^2-1} \cdot (1+\lambda). \quad (1.10)$$

Формула з роботи [244] по структурі відповідає формулі пружного розвантаження Ляме-Гадоліна, однак її права частина побудована з використанням експериментальних даних при деформувальному протягуванні отворів з трубчастих заготовок із сталей 10, 20, 45, 38ХМЮА і алюмінієвого сплаву АК6:

$$f(m, \lambda) = \frac{\sqrt{3}}{3} \left(\frac{2m}{m-1} \right)^{0,125}. \quad (1.11)$$

Якщо розглядати, що величина граничної пружної деформації в

позаконтактній зоні приблизно така ж як при роздачі трубчатої заготовки рівномірним внутрішнім зусиллям, в роботі [243] запропонована наступна залежність:

$$f(m, \lambda) = \beta \frac{1}{1 - \mu^2} \cdot \frac{(m^2 + 1)/2/m^2}{1 + \mu \sqrt{6 \ln m / (m^2 - 1)}}, \quad (1.12)$$

де β – коефіцієнт Лоде ($\beta=1..1,15$).

В роботі [91] наведено результати досліджень напружень при деформуванні внутрішньої поверхні циліндричної заготовки методами ППД.

При деформуванні циліндричної заготовки вібраційними методами ППД її зовнішня поверхня буде піддаватись дії пружних деформацій, а внутрішня – пластичних.

Напруження в процесі деформування циліндричної заготовки вібраційними методами ППД в зоні пластичних деформацій рівні границі текучості

$$\sigma_I = \sigma_T \quad (1.13)$$

Такі напруження можуть бути визначені за залежністю

$$\sigma_{II} = \frac{E \cdot \Pi}{2 \cdot \kappa \cdot r_{z.p.}} - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{r}{r_{z.p.}} \cdot p(1 - \mu) \quad (1.14)$$

де Π – припуск на обробку; κ – коефіцієнт, що залежить від припуску при деформуванні; $r_{z.p.}$ – радіус границі поділу пружної і пластичної зони; μ – коефіцієнт Пуасона; p – питомий тиск на внутрішню поверхню заготовки.

Після зняття навантаження зовнішня поверхня заготовки не зможе відновитись до початкових розмірів у зв'язку з тим, що її внутрішня поверхня

деформувалась пластично і має певну величину залишкових деформацій.

При цьому після зняття навантаження вказані поверхні матимуть деякі залишкові напруження, які для внутрішньої поверхні можна визначити за формулою:

$$\sigma_I = \frac{E \cdot \Pi}{2 \cdot \kappa \cdot r_{z.p.} (\delta_I + \delta_{II})} \times \left[2\sigma_T \kappa \cdot r_{z.p.} - E\Pi + (1-\mu) \frac{2 \cdot \kappa \cdot r_{z.p.} \cdot \delta_I \cdot \sigma_T + E\Pi \cdot \delta_{II}}{2 \cdot \kappa \cdot r_{z.p.} + \delta_{II} (1-\mu)} \right] \quad (1.15)$$

а для зовнішньої

$$\sigma_{II} = \frac{\delta_I}{2 \cdot \kappa \cdot r_{z.p.} (\delta_I + \delta_{II})} \times \left[E\Pi - (1-\mu) \frac{2 \cdot \kappa \cdot r_{z.p.} \cdot \delta_I \cdot \sigma_T + E\Pi \cdot \delta_{II}}{2 \cdot \kappa \cdot r_{z.p.} + \delta_{II} (1-\mu)} - 2 \cdot \sigma_T \cdot \kappa \cdot r_{z.p.} \cdot \delta_I \right] \quad (1.16)$$

де δ_I і δ_{II} – відповідно товщина зони пластичних і пружних деформацій заготовки при деформуванні.

По отриманих залежностях можна визначати характер зміни, а також численні числові значення вказаних параметрів процесу деформування при зміні припуску на обробку, глибини наклепаного шару, границі текучості матеріалу внутрішньої поверхні заготовки.

Досить актуальною є проблема проектування віброобкатників для обробки отворів великого діаметра. При великих діаметрах оброблюваних отворів маса робочої частини інструменту буде дуже великою і вібропривід доводиться робити великої потужності і значних габаритів.

Також проблемою є безперервність контакту кульки з оброблюваною поверхнею ускладнює процес тепловідведення, тобто знижує рівень допустимих швидкостей розкатування, що впливає на продуктивність процесу.

Теоретичні аспекти проблеми утворення регулярних мікрорельєфів досліджувались в роботах Шнейдера Ю.Г., Гавриша А.П., Киричка П.О., Афтаназіва І.С. та інших [81, 147, 193, 238, 265, 269].

Теоретичні дослідження процесу поверхневого пластичного деформування, як правило, здійснюються на основі розробки і аналізу математичних моделей контактної зони, геометричних параметрів і напруженого стану в контактній зоні і для виявлення їх якісних і кількісних залежностей, технічних показників розкатного інструмента від його конструктивних і силових параметрів.

Ці дослідження пов'язані з певними труднощами, тому що поверхневий шар при обробці деталей формується в результаті складних взаємопов'язаних процесів, що відбуваються в осередку деформації і прилеглих до нього зонах, багаторазових пружних і пластичних деформацій, зміни міцності і пластичних властивостей деформованого металу, тертя та теплових процесів, зміни макро-і мікроструктури, мікрогеометрії самої поверхні та інших явищ.

Характерно, що швидкість деформування в досить широких межах (рис. 1.17) на якість поверхневого шару надає значний вплив [269]. Це слід розглядати як можливість підвищення продуктивності обробки.

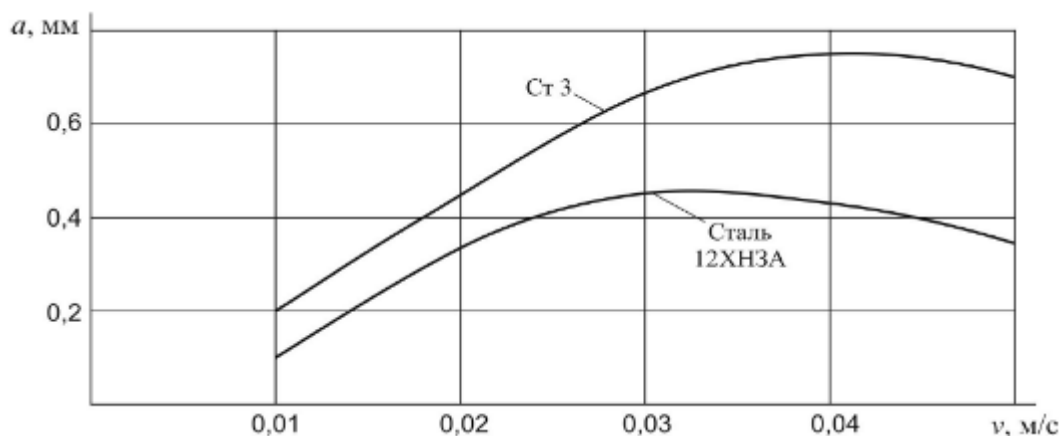


Рисунок 1.17 – Вплив швидкості обробки на величину зміцнення при $P=0,7$ мм

Сила, що діє на оброблювану поверхню з боку деформуючого елемента, найбільшою мірою впливає на параметри якості деталі ППД. Визначення

функціонального зв'язку між силою, яка додається до інструменту і параметрами якості деталей, є однією з основних задач досліджень в галузі обробки ППД.

Для обчислення зусилля деформування дослідниками запропоновано різні аналітичних залежностей. У зв'язку з тим, що при обробці ППД роликами в області контакту виникають складні фізико-механічні процеси, які не піддаються точній оцінці, то в більшості випадків звертаються до експериментальних досліджень, в результаті чого в даний час накопичений великий обсяг результатів експериментальних досліджень, які з високою ймовірністю дозволяються призначити раціональні режими обробки, що забезпечують необхідну якість і продуктивність.

Одним з відомих вчених, які зробили великий внесок у вивчення ППД і зокрема в обкатку кульками та роликами є Д. Д. Папшев, який запропонував формулу для розрахунку сили при обкатування кульками [214]

$$p = P_H / F_K \quad (1.17)$$

$$P_H \approx \pi \cdot (R_\omega \cdot \sin \alpha)^2 \quad (1.18)$$

$$F_K = \frac{8}{3} \cdot \sqrt{\frac{P_q \cdot R_p \cdot R}{R_q \pm R_p}} \cdot \left[\sqrt{(h+W) \cdot W} + W + \frac{1}{4} \sqrt{W \cdot h} \right] \quad (1.19)$$

де α – кут проникнення деформувального елемента; F_K – площа поверхні контакту; R – радіус профілю ролика; R_q – радіус деталі; R_p – радіус ролика; W – місцева пружна деформація; h – величина обтиснення; R_ω – розмір кульки.

Експериментально встановлено, що оптимальні значення α знаходяться в межах від $5^\circ 30'$ до 7° [214].

Складність контактної задачі для малих кутів проникнення деформувального елемента, що мають місце при ППД, обумовлена тим, що при

цих кутах величини пластичних і пружних деформацій співрозмірні, і рішення має ґрунтуватися на комплексному використанні положень теорії пластичності і пружності. Отже, повинна вирішуватися задача пружно-пластичного деформування металу.

Пластичні деформації в контакті деформувального елемента і матеріалу заготовки виникають після досягнення визначеного значення кута проникнення $\varphi = \varphi_y$. При $\varphi < \varphi_y$ зв'язок між радіусом контактної ділянки r і силою проникнення сферичного деформуючого елемента P в плоску поверхню тіла описується рівнянням Герца [79]

$$r = \left(\frac{3}{4} \cdot P \cdot R \cdot \theta \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1.20)$$

де $\theta = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ - пружна стала; E_1, E_2, ν_1, ν_2 - відповідно модулі пружності і коефіцієнти Пуассона де формувального елемента і металу. Можна встановити зв'язок між цими параметрами для проникнення сталюї кульки в сталь:

$$\bar{q} = \frac{P}{\pi \cdot r^2} \quad (1.21)$$

Тож середнє значення тиску при пружному проникненні змінюється прямо пропорційно $\sin \varphi$ [79].

Вищенаведені формули справедливі для умов деформування без врахування тертя, коли контактують тіла ізотропні підпорядковуються законом Гука, площа контакту мала і навантаження прикладені перпендикулярно до оброблюваної поверхні. Розглянуті процеси реально відбуваються в більш складних умовах, тому зазначені формули в даному вигляді мають обмежене застосування. Незважаючи на це, вони показують основні силові залежності при ППД.

У деяких роботах пропонується призначати режими пластичного

деформування на основі безрозмірного тиску [90]

$$\bar{q} = \frac{P}{F \cdot HV} \quad (1.22)$$

де F – площа плями контакту; HV - твердість по Вікерсу. Крім цього в цій же ж роботі пропонується призначати режими ППД використовуючи параметр B :

$$B = \bar{q} \cdot N^m \quad (1.23)$$

де $N = a_k \cdot i / S$ - кількість циклів навантаження поверхні; a_k - ширина плями контакту; S - подача; i - число проходів.

Проскураков Ю.Г. в якості розрахункової формули пропонує використати залежність [242]:

$$P = \frac{D_{B1} \cdot q^2}{0,12 \cdot E \left(\frac{D}{d} + 1 \right)} \quad (1.24)$$

де D_{B1} ; d - діаметр ролика; D - діаметр оброблюваного вала; q – середній тиск, E – модуль пружності, $q = (1,8-2,1) \sigma_T$.

В роботі [96] Браславским В.М. запропоновано використовувати формулу

$$P = 4 \cdot m \cdot D_{\omega}^{n-2} (\sin \varphi)^{n-2} \cdot \sin \varphi_a \cdot \frac{b_0}{a_0} \cdot r^2 \quad (1.25)$$

де D , - діаметр кульки; φ - середній кут проникнення кульки; φ_a – кут проникнення кульки; m , n – сталі, що характеризують властивості оброблюваного матеріалу; r - радіус кульки.

Нижче приведені залежності для визначення зусилля деформування

роликом отримані Алексеевим П.Г. і Шнейдером Ю.С. [269]:

$$P = \frac{7,65 \cdot h_n \cdot \sigma_T}{1 + \mu \cdot tg\varphi_m} \cdot \sqrt{\frac{R_q \cdot R_p \cdot R}{R_q \pm R_p}} \cdot \left((\Delta h + \varepsilon) + \sqrt{(\Delta h + \varepsilon) \cdot \varepsilon} \right) \quad (1.26)$$

де R_q - радіус деталі; R_p - радіус ролика; R - радіус профілю ролика; μ - коефіцієнт Пуассона; Δh - величина обтиснення; σ_T - границя текучості; h_n - коефіцієнт, що враховує наклеп; ε - місцева пружна деформація.

$$P = F_k \cdot q, \quad F_k = 2 \frac{4}{3} \cdot \frac{S}{R_{ucx}} \sqrt{d_\omega} \cdot \sum_{i=2}^{n/2} \left[(R_{ucx} - R) - \frac{S_i^2 (i-1)^2}{d_\omega} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (1.27)$$

де F_k - площа поверхні контакту; q - середній тиск; S_1 - крок вихідних нерівностей; d_ω - діаметр кульки; n - стала, що характеризує властивості оброблюваного матеріалу.

У загальному випадку шорсткість обробленої поверхні, ступінь її зміцнення, величина і знак залишкових напружень залежать від технологічних режимів ППД, зусилля деформування і подачі, вихідної шорсткості заготовки, фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки, типу застосовуваного інструмента і його конструктивних параметрів.

Виведено аналітичну залежність, що описує взаємозв'язок товщини зміцненого шару металу при віброобробці методами ППД і конструктивних параметрів інструменту і технологічних параметрів процесу обробки

$$a = K_1 \sqrt{\frac{\sigma_T \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot l_k \cdot h_k}{HRC \cdot m}} \quad (1.28)$$

де a - товщина зміцненого шару металу; $K_1 = 1,05..1,17$ - коефіцієнт, що залежить від коливань робочого інструменту; $K_2 = D/d$ - коефіцієнт, що залежить

від початкового зовнішнього D і внутрішнього d діаметрів деталі після обробки; l_k і h_k – відповідно довжина і висота поверхні контакту; HRC – твердість матеріалу деталі; m – маса металу, що зсувається на торець зразка в процесі обробки.

Вперше частково регулярні мікрорельєфи, сформовані на торцевих поверхнях тіл обертання були використані як декоративні елементи. Спосіб їх формування був запропонований Шнейдером Ю.Г. [269] і передбачав утворення по траєкторії спіралі Архімеда частково регулярного мікрорельєфу (ЧРМР) за допомогою пружно підтиснутої кульки з трохоїдою формою канавки.

Також був проведений розрахунок відносної площі канавок сформованих на торцевій поверхні тіл обертання. Він вказує на те, що особливістю такого мікрорельєфу є закономірна зміна ступеня перекриття канавок із зміною радіуса торцевої поверхні, що визначає особливості розрахунку ряду важливих параметрів такого мікрорельєфу. Зокрема для мікрорельєфу I виду залежність для визначення відносної площі канавок сформованих на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання» є такою:

$$F_k = \frac{200 \cdot \rho}{3 \cdot s_1 \cdot R_{cp}} \left(2 \cdot R_{cp} + \sqrt{R_{cp}^2 + e^2 \cdot i^2} \right); \quad (1.29)$$

для мікрорельєфу II виду

$$F_k = \frac{200 \cdot \rho}{3 \cdot \pi \cdot s_1 \cdot R_{cp}} \left[\pi \left(2 \cdot R_{cp} + \sqrt{R_{cp}^2 + e^2 \cdot i^2} - 6 \cdot \rho \cdot i \right) \right]; \quad (1.30)$$

де i – кількість осциляцій віброобкатника, дв. ходів /хв.

ρ – радіус відбитка канавки (ширина канавки);

$R_{cp} = (R_1 + R_2) / 2$ – середній радіус вібронакатаної ділянки торцевої

поверхні, мм;

s_1 – поперечна подача віброобкатника, мм/об.

Пропоновані підходи є основою визначення площі канавок V-подібної форми ЧРМ, що сформований на торцевих поверхнях тіл обертання.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що відомі досить різноманітні залежності для визначення показників якості обробленої поверхні, зусилля деформування і подачі, а також геометричних параметрів в залежності від шорсткості, профільного радіуса, пластичних властивостей матеріалів, площі контакту. Велика різноманітність формул, запропонованих різними авторами, дозволяє провести глибокий аналіз і осмислення фізики процесу обробки ППД. Однак, наведені вище залежності відображають окремі особливості розглянутих процесів і включають експериментальні коефіцієнтів, що підлягають визначенню при зміні умов деформування.

Як правило, розглянуті теоретичні дослідження перевіряються і уточнюються в процесі випробувань експериментальних зразків інструментів і устаткування на стендах, в лабораторних і виробничих умовах із записом основних показників на профілометра, а також з використанням безпосередніх вимірів геометрії контактної зони за допомогою інструментальних мікроскопів та інших сучасних методів. При цьому експериментальні дослідження проводяться з використанням їх оптимальних методів планування і організації та сучасних методів статистичної обробки результатів вимірювань.

В цілому такий підхід називається аналітико-експериментальним. В останні роки досить сильно розвинувся підхід, який передбачає моделювання і випробування моделей, розроблених у спеціальних середовищах, таких як Ansys, який дозволяє моделювати за допомогою методу скінчених елементів. Такі середовища, при досить точній побудові моделі, дозволяють отримати уявлення про характер напружень у будь-якій точці модельованого середовища.

Подальший розвиток способи утворення регулярних мікрорельєфів отримали в технічних рішеннях запропонованих Киричком П.О. [230].

Суть якого полягає у нанесенні регулярного мікрорельєфу вібраційним

обкочуванням з наступним нанесенням шару хрому на оброблену поверхню з метою підвищення зносостійкості. Особливістю цього патенту є те, що в ньому вказані режими формування РМР, а також його параметри після нанесення, зокрема висота напливів, ширина та глибина мікрорельєфу.

Цікавим з точки зору забезпечення параметрів РМР з спосіб утворення мікрорельєфу [223]. Суть способу полягає у формування РМР здійснюють у два переходи (рис. 1.18), на першому переході на поверхні виконують частково регулярний мікрорельєф синусоїдального типу ввігнутої форми індентором з радіусом наконечника $R=0,5-4$ мм при подачі $s=0,7-4,0$ мм/об і частоті обертання деталі $n_3=100-400$ об/хв, після чого на другому переході зменшують зусилля вдавлювання на 50-75 %, подачу до $s=0,02-0,1$ мм/об та кількість обертів заготовки $n_3=50-200$ об/хв, залишають при цьому постійним кількість осциляцій.

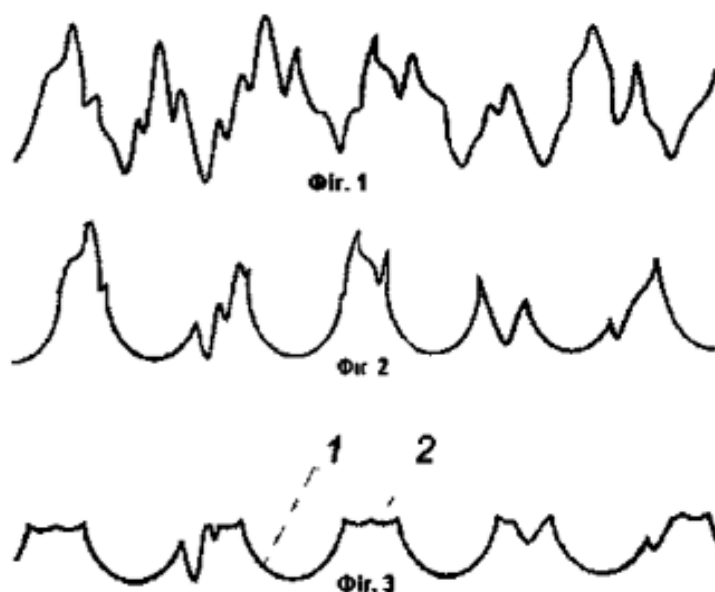


Рисунок 1.18 – Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу:

1 – поверхня сформована під час першого проходу; 2 – поверхня сформована під час другого проходу

При цьому утворюють на поверхні повністю регулярний мікрорельєф тетрагонального або гексагонального типу на ділянках, що не були оброблені на першому переході, при цьому змінені внаслідок повторного проходу

деформуючого елемента параметри частково-регулярного мікрорельєфу розраховують за формулою:

$$F_n = \frac{4\sqrt{(P_1 - P_2)(2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot HV - P_1 - P_2)}}{\pi^2 \cdot HV \cdot R \cdot d_3 \cdot s_1} \left(\sqrt{(4 \cdot e \cdot i_1)^2 + (\pi \cdot d_3)^2 + s_1^2} - i_1 \cdot k \right) \cdot 100\% \quad (1.31)$$

де F_n – відносна площа, що займають нерівності, %;

P_1 – сила вдавлювання індентора на першому переході, Н;

P_2 – сила вдавлювання індентора на другому переході, Н;

R – радіус індентора, мм;

HV – твердість матеріалу, Н/мм²;

d_3 – діаметр деталі, мм;

s – подача інструмента на першому переході, мм;

e – амплітуда осциляції інструмента, мм;

i_1 – відношення частоти осциляції інструмента $n_{подв.х.}$ до частоти обертання деталі n_3 на першому переході;

k – площа нерівностей, що перетинаються на довжині хвилі осциляції внаслідок першого переходу, розраховується за спеціально розробленою програмою.

Перевагою даного способу є те, що за рахунок підвищення мікротвердості на ділянках 1 на 10-12% й на ділянках 2 на 4-7%, усунення напливів по краях нерівностей, утворених на першому переході, утворення мікрорельєфу на поверхні з визначеною відносною опорною площею, досягти зміцнення поверхні на 22-27% й 27-31% після першого та другого переходів.

Дослідниками із University of the Basque Country, (Іспанія) розроблено інструмент динамічної дії (рис.1.19) для формування необхідного мікрорельєфу, який забезпечує зменшення висоти мікронерівностей профілю шорсткості та збільшення опорної площі поверхні.

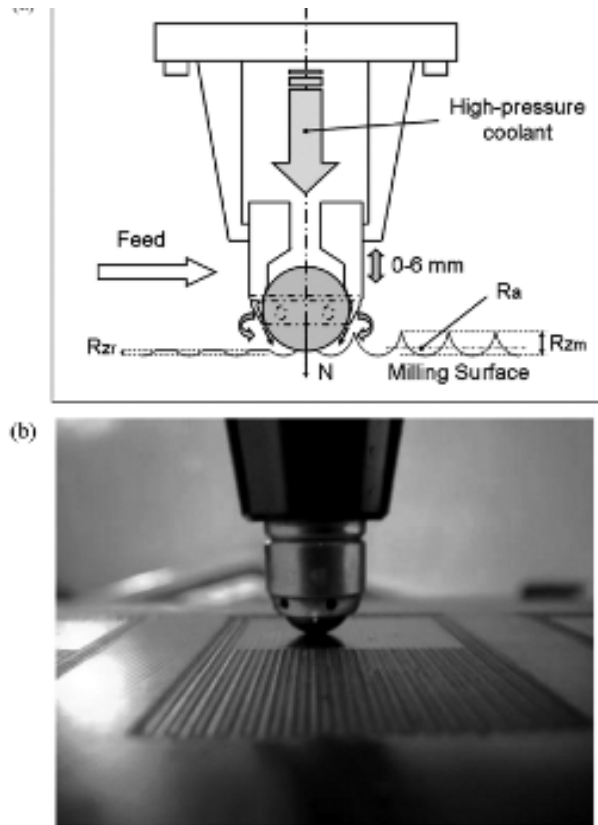


Рисунок 1.19 – Пристрій динамічної дії для формування мікрорельєфів
 а) схема роботи пристрою; б) процес формування мікронерівностей

Під час поступального руху інструменту вздовж оброблюваної поверхні на деформувальний елемент подаються короткострокові імпульси сили в напрямку перпендикулярному до площі поверхні, яку оброблюють. При цьому відбувається змінання вершин мікронерівностей. Причому даним інструментом можна формувати мікрорельєфи на складних поверхнях, зокрема сферичних. Результати досліджень з використанням даного інструмента описані в роботах [42, 55].

Аналогічний за принципом дії інструмент (рис. 1.20) був спроектований іншими Іспанськими вченими і представлений в роботі [24].

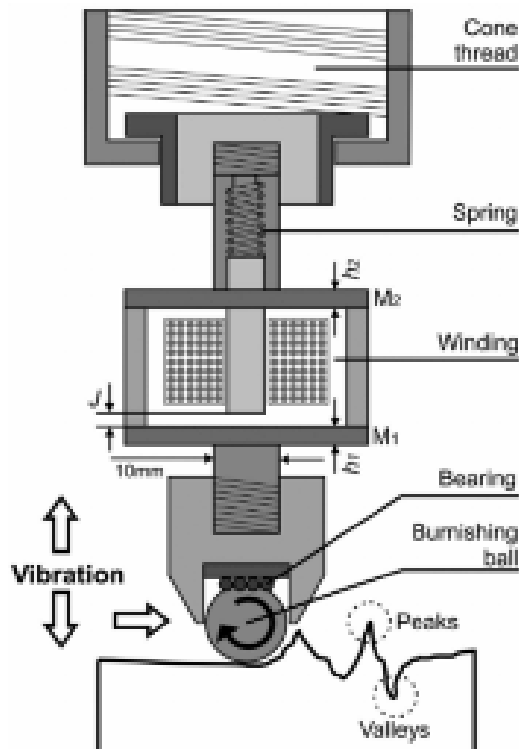


Рисунок 1.20 – Схема пристрою динамічної дії для формування мікрорельєфів

Принцип роботи пристрою аналогічний вищеописаному. В роботі [24] наведені результати формування мікрорельєфу за допомогою вібрацій в напрямку перпендикулярному площині поверхні, яка оброблюється при різних режимах оброблення.

Заслуговує також уваги машинний комплекс розроблений вченими із університету Варни (Болгарія), який дозволяє здійснювати формування регулярного мікрорельєфу на різних типах поверхонь: плоскій, циліндричній, профільній. Комплекс із токарного верстату та спеціального інструменту. При обробці поверхонь, які знаходяться в різних площинах використовують ділильну головку. На дослідному зразку було спроектовано профільні поверхні (рис.1.21) на яких був сформований регулярний мікрорельєф. Результати досліджень з використанням цього інструменту детально описані в роботі [57].

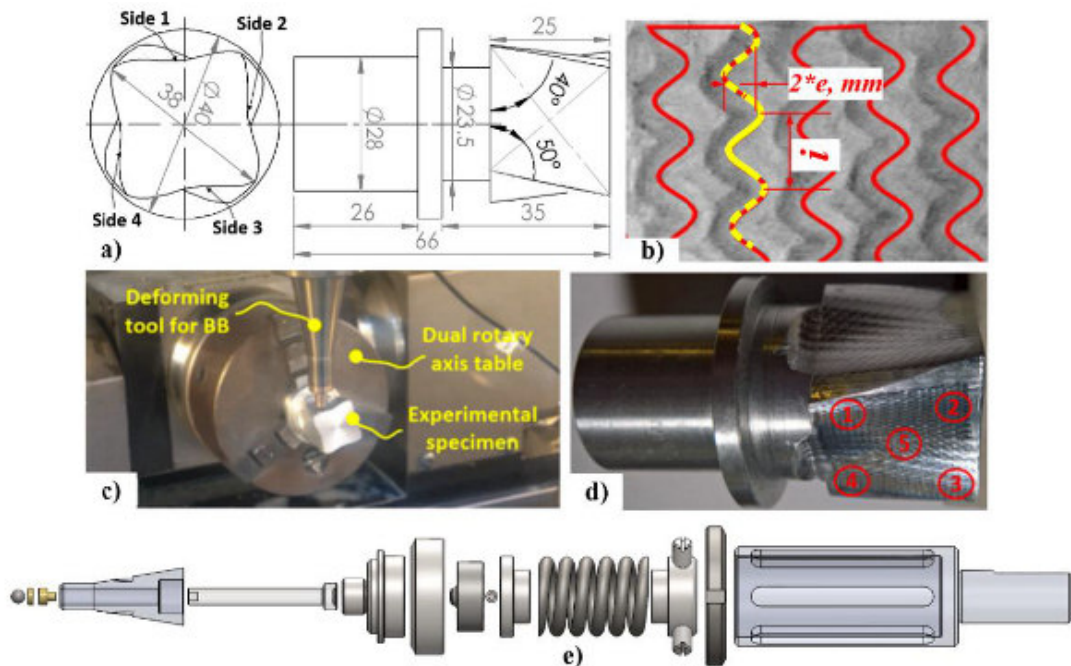


Рисунок 1.21 – Дослідний зразок та інструмент для формування регулярних мікрорельєфів на профільних поверхнях

Отже, встановлено, що встановлено, що існує інструментальне забезпечення не задовольняє потреби виробництва, зокрема не забезпечує задану точність обробки та не дозволяє формувати на робочих поверхнях деталей класу «тіла обертання» регулярні мікрорельєфи із заданими геометричними параметрами.

1.5. Висновки до першого розділу

1. Встановлено основні вимоги до параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» в залежності від умов експлуатації. На основі огляду літературних джерел та аналізу експлуатаційних пошкоджень тривало експлуатованих деталей встановлено причини незабезпечення належних експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» та розглянуто основні напрямки покращення якісних параметрів цих поверхонь технологічними методами. Проаналізовано типову структуру технологічних операцій для формування цих показників та виявлені можливості для їх удосконалення. Встановлено, що причиною виникнення

експлуатаційних пошкоджень є, в основному, відсутність комплексного підходу до забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання». При цьому не враховується явище технологічної спадковості та взаємного впливу параметрів якості між собою.

2. Встановлено наявність технологічних та геометричних параметрів, вплив яких на параметри якості поверхні може бути суттєвим. До таких параметрів належать форма та діаметр поверхні деталей класу «тіла обертання», стохастичність подачі верстату та інші. В літературних джерелах відсутні методи врахування цього впливу, його ступінь не визначена і вони не знайшли свого відображення у відповідних аналітичних залежностях.

3. Встановлено, що формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях деталей класу «тіла обертання» внаслідок вібраційної обробки призводить до складних коливань деталі, вплив яких на форму мікрорельєфу не враховано. Відсутні математичні моделі, які описують динаміку процесу рельєфоутворення в залежності від технологічних параметрів вібраційної обробки.

4. На основі аналізу технологій створення регулярних мікрорельєфів встановлено що регулярні мікрорельєфи, створені на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» фактично є частково регулярними. Вони володіють рядом суттєвих відмінностей від мікрорельєфів, створених на циліндричних поверхнях і практично не досліджені. Їх створення можливе без вібраційним способом на фрезерних верстатах з ЧПК. Однак відсутні математичні моделі для опису їх конструктивних особливостей та технологічні основи для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей поверхонь із такими мікрорельєфами.

5. Проаналізовано конструкції інструментів та інструментальних комплексів, які використовуються при механічній обробці поверхонь деталей класу «тіла обертання» та встановлено, що існуюче технологічне забезпечення не задовольняє потреби виробництва, забезпечувати задану точність обробки та формувати на таких поверхнях регулярні мікрорельєфи із заданими геометричними параметрами.

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН У ВИГЛЯДІ ТІЛ ОБЕРТАННЯ

2.1 Технологічна спадковість і точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь гідроциліндрів

Під терміном «технологічна спадковість» з врахуванням [272] будемо розуміти явище переносу форми, геометричних параметрів і властивостей оброблюваної поверхні від попередніх до наступних технологічних операцій, яке в подальшому відображається на експлуатаційних властивостях деталей машин.

Аналіз і оцінка існуючих технологічних процесів, які складаються із сукупності певної послідовності технологічних операцій надали можливість технологічну спадковість класифікувати на три види: позитивна – коли при виконанні в заданій послідовності технологічних операцій якісні показники оброблених поверхонь покращуються; нульова – коли якісні показники незмінні і негативна – коли якісні показники оброблюваної поверхні, отримані на наступній операції гірші ніж на попередній.

Одним із головних показників якості циліндричних (зовнішніх і внутрішніх) поверхонь гідроциліндрів є точність їх форми у поперечних перерізах, яка визначається таким параметром як відхилення від круглості.

Нормування відхилень від круглості регламентовано відповідними стандартами, наприклад ГОСТ 24642-81, і полягає в обмеженні їх допусками [107]. Відхилення від круглості [272] визначаються як максимальні відхилення реальних профілів від вписаного у круглограму кола для внутрішніх циліндричних поверхонь і описаного кола навколо круглограми – для зовнішніх циліндричних поверхонь.

Таке подання точності форми з точки зору інформативності є недостатнім і не може бути використано для виявлення і аналізу причини, які впливають на

точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь.

Більш прогресивним у дослідженні точності форм поперечних перерізів циліндричних поверхонь є використання методу апроксимації відхилень радіуса-вектора реального профілю від номінального на проміжку $[0, 2\pi]$, як випадкової величини, тригонометричним рядом Фур'є [271, 139]. Для оцінки точності форми циліндричних поверхонь використовують також метод Спрега [157], за яким відхилення від круглості приймають як відхилення радіуса-вектора реального профілю від усередненого номінального профілю. Основним недоліком цього методу є те, що перша гармоніка тригонометричного ряду Фур'є у спектрі гармонік відсутня, а величину ексцентриситету визначають як віддаль між двома центрами двох систем координат. Окрім цього при визначенні дисперсії розсіювання відхилень від круглості тригонометричним рядом Фур'є не враховується амплітуда першої гармоніки, що вносить значну похибку у значення дисперсії.

Аналіз існуючих методів оцінювання точності форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь показав, що таке оцінювання здійснюється, як правило, після фінішної операції технологічного процесу. Одним із пояснень такого стану є відсутність високопродуктивного імовірнісного методу оцінки впливу технологічної спадковості на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь, на основі якого можна було б здійснювати корекцію технологічних операцій направлену на їх удосконалення і забезпечення високої якості обробки циліндричних.

Тому дослідження впливу технологічної спадковості на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь здійснене в імовірнісному аспекті з використанням теорії малих вибірок є безперечно актуальною проблемою.

Розглянуто вплив технологічності спадковості на точність поперечних перерізів гідроциліндрів, коли справедливі наступні припущення.

1. відхилення від круглості на проміжку $[0, 2\pi]$ подано випадковою періодичною функцією.

2. Закономірність зміни відхилень від круглості по всій довжині гідроциліндра приймемо постійною.

3. Всі гідроциліндри у вузлах машин за кутом повороту орієнтовані так, що кути, які визначають максимальне відхилення від круглості постійні.

4. Значення відхилень від круглості на проміжку $[0, 2\pi]$ через заданий кутовий крок є величини випадкові, які підпорядковані закону розподілу Релея (ексцентриситету).

Взявши до уваги те, що відхилення від круглості Δ_i на проміжку $[0, 2\pi]$ є випадкова періодична функція $f(\Delta)$, обмежившись 10-ма гармоніками $k=[1, 10]$ подамо $f(\Delta)$ тригонометричним рядом Фур'є.

$$f(\Delta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{10} (a_k \cdot \cos k\Delta + b_k \cdot \sin k\Delta), \quad (2.1)$$

звідки отримаємо: середнє значення відхилення від круглості, яке приблизно дорівнює математичному сподіванню $a_0 = \bar{\Delta} \approx M(\Delta)$; значення гармонік $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$, тут a_k і b_k – коефіцієнти ряду Фур'є; дисперсію розсіювання $D(\Delta) = \sum_{k=1}^{10} A_k^2 / 2$.

Отримані характеристики розсіювання відхилень від круглості для кожної із круглограм знятою із i -го досліджуваного зразка j -ої технологічної операції $\bar{\Delta}_{ij}$ і $D_0(\bar{\Delta}_{ij})$ подаємо як випадкові величини, які формують відповідні статистичні ряди.

Для визначення вибірових характеристик розсіювання відхилень від круглості геометричних перерізів гідроциліндрів використовуємо теорію малих вибірок [157].

При цьому проміжок $[a, b]$ зміни значень величини Δ вважається відомим і також врахувавши закон розподілу Релея [4, 31], що $a = 0$ $b = \Delta_{\max}$ (Δ_{\max} -

найбільше значення серед Δ_i ($i = 1, n$) експериментальних даних випадкової величини Δ).

На початковому етапі значення густини (щільності) розподілу $f(\Delta)$ вважається, що ще не проведено жодного досліду і приймається, що випадкова величини Δ розподілена за законом рівної імовірності.

$$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \Delta \in [a, b] \\ 0 & \Delta \notin [a, b]. \end{cases} \quad (2.2)$$

Позначено $1/b$ через $f_0(\Delta)$. Назвемо $f_0(\Delta)$ апіорною (до проведення досліду) щільністю розподілу досліджуваної випадкової величини Δ .

Наступний крок полягає у врахуванні результату першого досліду для уточнення апіорної щільності розподілу $f_0(\Delta)$. Для цього апостеріорна (після першого досліду) щільність розподілу $f_1(\Delta)$ випадкової величини Δ подається у вигляді:

$$f_1(\Delta) = c_1 [f_0(\Delta) + \varphi_1(\Delta)], \quad (2.3)$$

де стала c_1 визначається з умови нормування $c_1 = \int_a^b f_1(\Delta) d\Delta = 1$;

$\varphi_1(\Delta)$ - щільність розподілу імовірностей після першого досліду.

Для врахування результату другого досліду за апіорну щільність випадкової величини Δ приймається $f_1(\Delta)$, а її апостеріорна (після другого досліду) щільність розподілу $f_2(\Delta)$ визначається за формулою:

$$f_2(\Delta) = c_2 [f_1(\Delta) + \varphi_2(\Delta)],$$

де стала c_2 визначається з умови нормування $c_2 = \int_a^b f_2(\Delta) d\Delta = 1$;

$\varphi_2(\Delta)$ - щільність розподілу імовірностей після другого досліді.

Якщо у формулу для $f_2(\Delta)$ підставити вираз $f_1(\Delta)$, то вона набуде вигляду:

$$f_2(\Delta) = c_1 \cdot c_2 f_0(\Delta) + c_1 \cdot c_2 \varphi_1(\Delta) + c_2 \cdot \varphi_2(\Delta). \quad (2.4)$$

Застосувавши такий підхід для i дослідів отримаємо

$$f_i(\Delta) = c_1 \cdot c_2 \cdot \dots \cdot c_i \cdot f_0(\Delta) + c_1 \cdot c_2 \cdot \dots \cdot c_i \cdot \varphi_1(\Delta) + c_2 \cdot c_3 \cdot \dots \cdot c_i \cdot \varphi_2(\Delta) + c_i \cdot \varphi_i(\Delta). \quad (2.5)$$

або

$$f_i(\Delta) = f_0(\Delta) \prod_{k_0=1}^i c_{k_0} + \sum_{k_0=1}^i \varphi_{k_0}(\Delta) \cdot \prod_{i_0=k_0}^i c_{i_0},$$

де c_1, c_2, \dots, c_i визначаються із умов нормування

$$\int_a^b f_{k_0}(\Delta) d\Delta = 1, \quad (k_0 = \overline{3, i}). \quad (2.6)$$

Врахувавши закон розподілу Релея [157], щільністю розподілу імовірностей k -го досліді $\varphi_{k_0}(\Delta)$ приймаємо у вигляді

$$\varphi_{k_0}(\Delta) = \frac{\Delta}{\sigma_{0k_0}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma_{0k_0}^2}}, \quad (2.7)$$

де σ_{0k_0} - середнє квадратичне відхилення значень координат x і z [157];
 $\sigma_{0k_0} = 1,527 \cdot \sigma_{Ri}$ ($i = 1, 5$), тут σ_{Ri} - середнє квадратичне відхилення

ексцентриситету [157].

Знайдемо сталі c_{k_0} ($k_0 = \overline{1, n}$).

Якщо $k_0 = 1$ отримаємо

$$\int_a^b f_1(\Delta) d\Delta = c_1 \int_a^b [f_0(\Delta) + \varphi_1(\Delta)] d\Delta = 1. \quad (2.8)$$

Звідки

$$c_1 = \frac{1}{\int_a^b [f_0(\Delta) + \varphi_1(\Delta)] d\Delta}, \quad (2.9)$$

$$\text{де } \varphi_1(\Delta) = \frac{\Delta}{\sigma_{0_1}^2} \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma_{0_1}^2}}.$$

Обчисливши інтеграли

$$\int_a^b f_0(\Delta) d\Delta \text{ і } \int_a^b \varphi_1(\Delta) d\Delta \quad (2.10)$$

Отримаємо

$$c_1 = \frac{1}{2 + e^{-\frac{a^2}{2\sigma_{0_1}^2}} - e^{-\frac{b^2}{2\sigma_{0_1}^2}}}. \quad (2.11)$$

Сталі $c_2 \dots c_i$ знаходяться аналогічно і таку формулу для обчислення сталих c_{k_0} можна записати так

$$c_{k_0} = \frac{1}{2 + e^{\frac{a^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} - e^{\frac{b^2}{2\sigma_{0k_0}^2}}}. \quad (2.12)$$

Із врахуванням формул (2.1) і (2.2) і виразу $f(\Delta) = \frac{1}{b-a}$, шукана щільність розподілу $f(\Delta)$ запишеться у вигляді

$$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} \prod_{k_0=1}^i c_{k_0} + \Delta \sum_{k_0=1}^i \frac{1}{\sigma_{0k_0}^2} \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} \cdot \prod_{i_0=k_0}^i c_{i_0}, & \text{якщо } \Delta \in [a; b] \\ 0, & \text{якщо } \Delta \notin [a; b] \end{cases} \quad (2.3)$$

де сталі c_{k_0} ($k_0 = \overline{1, i}$) обчислюється за формулою (2.3).

Математичне сподівання $M(\Delta)$ випадкової величини Δ визначається за формулою

$$M(\Delta) = \frac{1}{b-a} \prod_{k_0=1}^i c_{k_0} \int_a^b \Delta d\Delta + \sum_{k_0=1}^i \frac{1}{\sigma_{0k_0}^2} \cdot \prod_{i_0=k_0}^i c_{i_0} \int_a^b \Delta^2 e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} d\Delta. \quad (2.14)$$

Обчисливши інтеграли $\int_a^b \Delta d\Delta$ і $\int_a^b \Delta^2 e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} d\Delta$ із змінними границями інтегрування $[a; b/\sigma_{0k_0}]$ формула для визначення $M(\Delta)$ набуде вигляду

$$M(\Delta) = \frac{a+b}{2} \prod_{k_0=1}^i c_{k_0} + \sum_{k_0=1}^i \prod_{i_0=k_0}^i c_{i_0} \left\{ a \cdot e^{-\frac{a^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} - b \cdot e^{-\frac{b^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} + \sqrt{2\pi} \sigma_{0k_0} \left[\Phi\left(\frac{b}{\sigma_{0k_0}}\right) - \Phi\left(\frac{a}{\sigma_{0k_0}}\right) \right] \right\} \quad (2.15)$$

Дисперсія $D(\Delta)$ визначається за формулою

$$D(\Delta) = \int_a^b \Delta^2 f(\Delta) d\Delta - [M(\Delta)]^2. \quad (2.16)$$

Із врахування формули (2.4) маємо

$$\int_a^b \Delta^2 f(\Delta) d\Delta = \frac{1}{b-a} \prod_{k_0=1}^i c_{k_0} \int_a^b \Delta^2 d\Delta + \sum_{k_0=1}^i \prod_{i_0=1}^i c_{i_0} \frac{1}{\sigma_{0k_0}^2} \int_a^b \Delta^3 \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} d\Delta. \quad (2.17)$$

Обчисливши інтеграли $\int_a^b \Delta^2 d\Delta$ і $\int_a^b \Delta^3 \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} d\Delta$, отримаємо формулу для

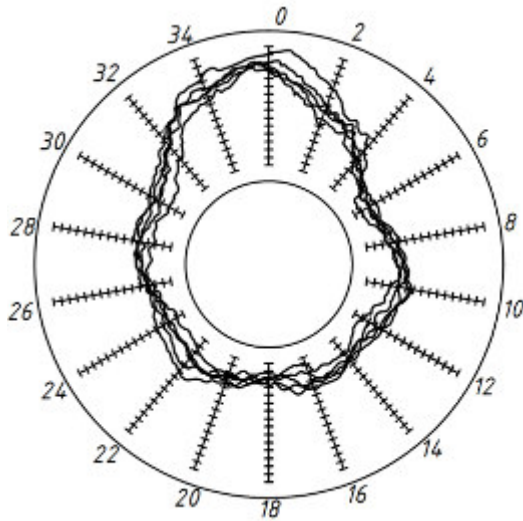
визначення дисперсії $D(\Delta)$ такого вигляду

$$D(\Delta) = \frac{a^2 + ab + b^2}{3} \prod_{k_0=1}^i c_{k_0} + \sum_{k_0=1}^i \prod_{i_0=k_0}^i c_{i_0} \left[a^2 \cdot e^{-\frac{a^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} - b^2 \cdot e^{-\frac{b^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} + 2\sigma_{0k_0}^2 \left(e^{-\frac{a^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} - e^{-\frac{b^2}{2\sigma_{0k_0}^2}} \right) \right] - [M(\Delta)]^2. \quad (2.18)$$

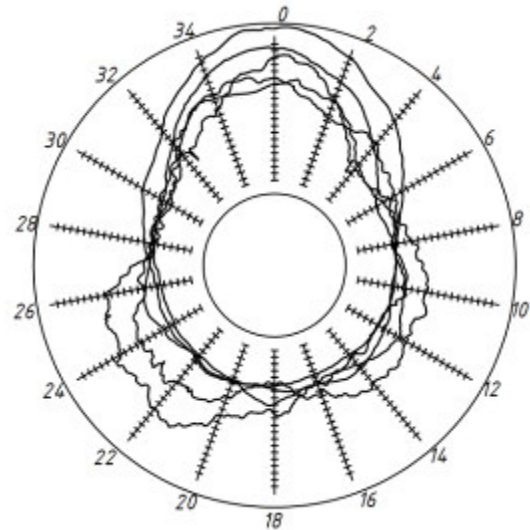
В процесі дослідження точності форми внутрішніх циліндричних поверхонь кожної із партій обсягом 5 дослідних зразків гільз гідроциліндрів згідно із протоколом намірів про науково-технічне співробітництво із Дрогобицьким заводом автомобільних кранів (додаток 1), отриманих після виконання кожної із технологічних операцій: чорнове розточування; напівчистове розточування; фінішне чистове розточування семи роликовою головкою, отримані круглограми схематично подані на рисунку 2.2 (окремо подані у додатку 2).

Знайшовши в кожному із 36 положень відхилення від круглості Δ_i

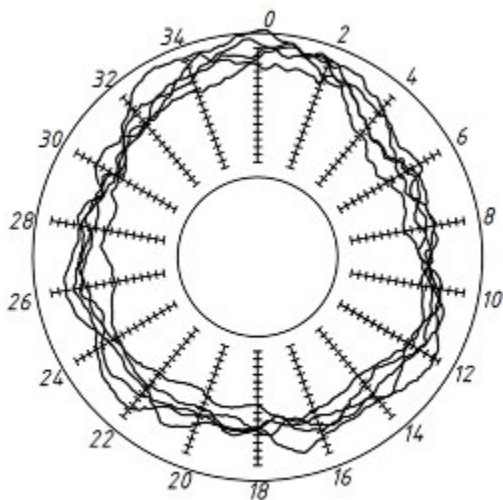
(результати наведені у додатку 3) як різницю віддалі від точки реального профілю до вписаного у круглограму кола і апроксимувавши отримані дані тригонометричним рядом Фур'є (2.1). Програму для апроксимації тригонометричним рядом Фур'є наведено у додатку 4.



а)



б)



в)



а) – чорнове розточування; б) – напівчистове розточування; в) – фінішне чистове розточування семи роликовою головкою

Рисунок 2.2 – Круглограми відхилення поперечних перерізів внутрішньої циліндричної поверхні дослідних зразків гідроциліндрів після виконання технологічних операцій:

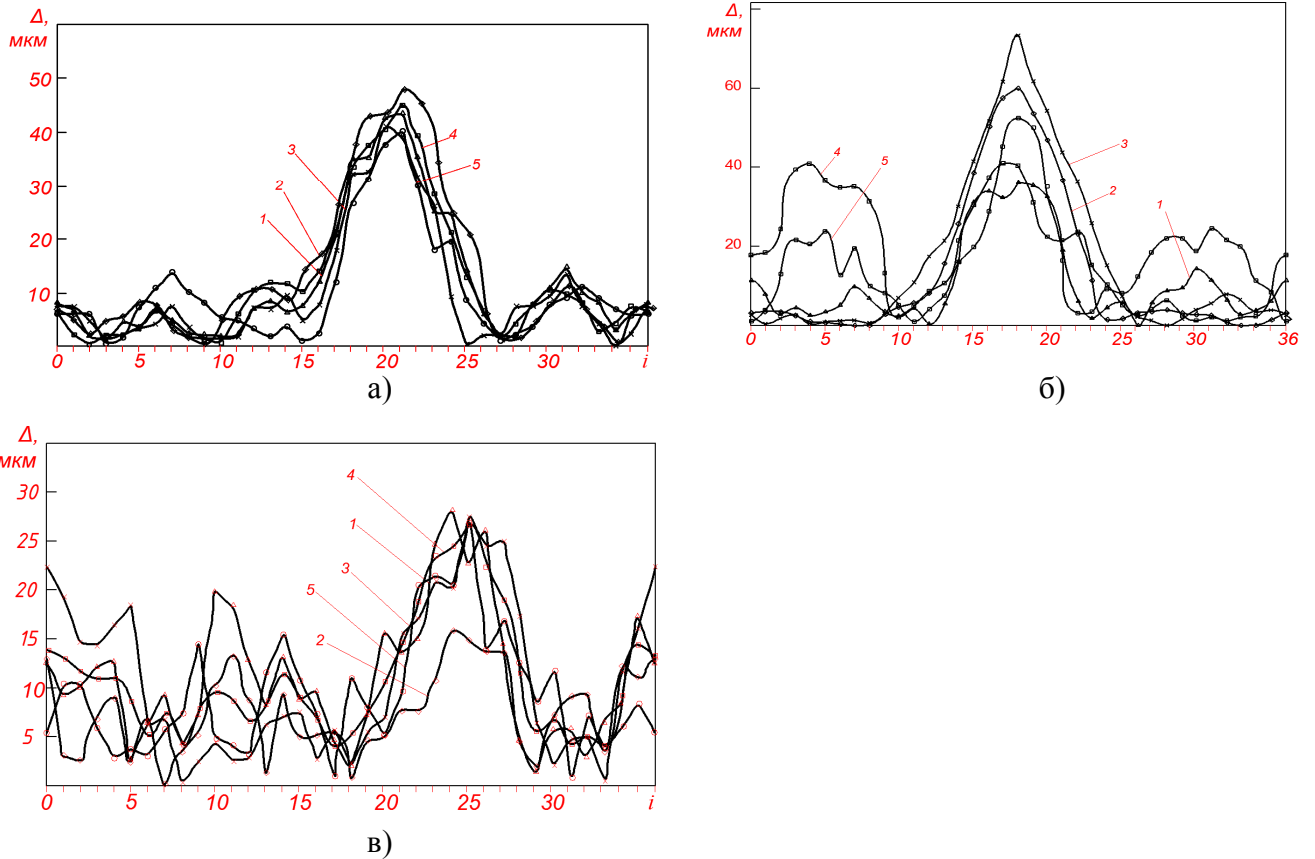


Рисунок 2.3 – Ансамбль із 5 реалізацій відхилення від круглості ВЦП гільзи гідроциліндра після чорнової обробки

В результаті розрахунків отримали характеристики розсіювання відхилень від круглості для кожної із круглограм; $\bar{\Delta}_{ij}$ – середнє значення, яке приблизно дорівнює математичному сподіванню; σ_{0ij} – середнє квадратичне відхилення значень координат x_{i0} і y_{i0} відповідних точок, які подані в таблиці 2.1, а також спектр амплітуд, для кожного із 5-ти зразків виконуваних технологічних операцій, які подані у таблиці 2.2.

Подані дані $\bar{\Delta}_{ij}$ в таблиці 2.1 приймаємо як випадкові величини. Скориставшись [271] для закону розподілу Релея і даними таблиці 2.1 для кожної j -ої операції знайдемо максимальне поле розсіювання $\Delta_{pj\max} = 3,44 \cdot \sigma_{0ij\max}$, яке приймаємо за верхню границю інтегрування, тобто $\Delta_{pj\max} = b$.

Таблиця 2.1 – Характеристики розсіювання відхилень від круглості внутрішніх циліндричних поверхонь поперечних перерізів гідроциліндрів

№ j -ої операції	Технологічна операція	Середнє значення $\bar{\Delta}_{ij}$ чисельник, мкм; середнє квадратичне відхилення σ_{0ij} – знаменник, мкм				
		Порядковий номер круглограми				
		№1	№2	№3	№4	№5
1	Чорнове розточування	$\frac{11,98}{11,09}$	$\frac{13,68}{13,8}$	$\frac{10,51}{11}$	$\frac{12,13}{12,3}$	$\frac{10,38}{9,97}$
2	Напівчистове розточування	$\frac{10,97}{10,6}$	$\frac{13,34}{18,5}$	$\frac{18,17}{22,16}$	$\frac{18,03}{13,61}$	$\frac{17,54}{12,2}$
3	Чистове розточування	$\frac{11,21}{6,3}$	$\frac{7,34}{3,62}$	$\frac{10,82}{7,61}$	$\frac{10,64}{5,86}$	$\frac{9,43}{5,42}$

Таблиця 2.2 – Амплітуди гармонік апроксимованих тригонометричним рядом Фур'є відхилень від круглості внутрішніх циліндричних поверхонь отриманих після реалізації кожної технологічної операції.

№ j -ої операції	Значення амплітуд									
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
1	12,36	8,53	6,44	2,96	0,52	2,34	0,58	0,43	0,81	0,65
2	9,09	8,53	7,14	3,17	1,61	1,23	1,99	1,2	1,32	0,43
3	3,02	3,81	6,58	0,95	1,48	0,21	2,04	0,98	1,89	0,57

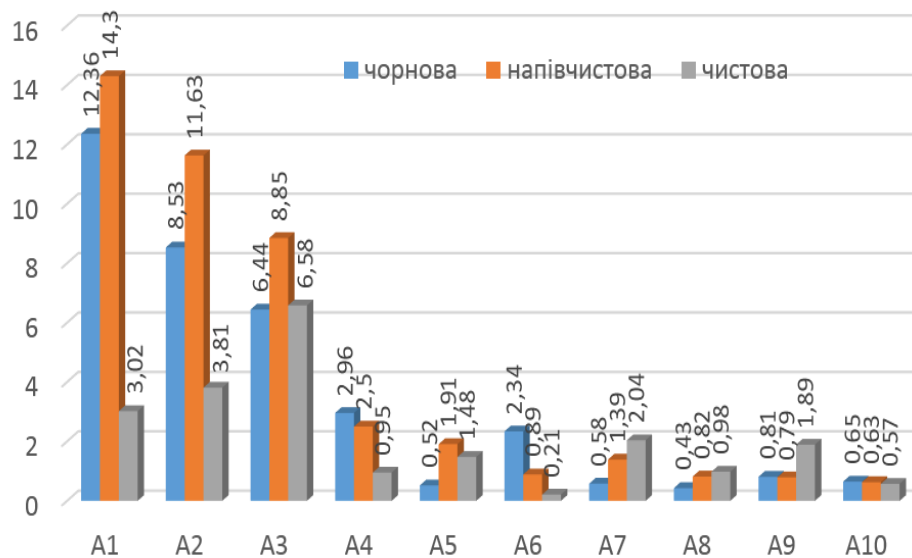


Рисунок 2.6 – Розподіл амплітуд гармонік при аналізі точності отворів гільз гідроциліндрів

Аналіз значень амплітуд наведених у таблиці 2 (рис. 2.6) показує, що тригонометричні ряди Фур'є сходяться, і це дає підстави стверджувати про задовільну апроксимацію відхилень від круглості.

Використавши формули (2.5), (2.6) та [271] і здійснивши обчислення, отримали вибіркові значення математичного сподівання – $M(\Delta)$ відхилення від круглості, дисперсії – $D(\Delta)$ і максимальні значення полів розсіювання – Δ_{\max} , які подані у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вибіркові характеристики розсіювання відхилень від круглості форми поперечного перерізу внутрішньої поверхні гідроциліндрів після виконання технологічних операцій

№ j -ої операції	Технологічна операція	Вибіркові характеристики		
		$M(\Delta)$, мкм	$D(\Delta)$, мкм ²	Δ_{\max} , мкм
1	Чорнове розточування	14,1	61,8	27,0
2	Напівчистове розточування	18,4	133,3	39,7
3	Чистове розточування	8,2	24,9	17,2

Використавши [157] і дані таблиці 2.3 та врахувавши, що випадкова величина підпорядкована закону розподілу Релея оцінку відмінностей (розходження) між двома середніми квадратичними відхиленнями (стандартами) здійснено за допомогою критерію.

$$t_s = \frac{\sqrt{2n} |D(\Delta)_1 - D(\Delta)_2|}{\sqrt{D(\Delta)_1 + D(\Delta)_2}}, \quad (2.19)$$

де $\sigma(\Delta)$ і $D(\Delta)$ – відповідно середнє квадратичне відхилення і дисперсія, а індекси при цих величинах – номери технологічних операцій.

А за двома дисперсіями за критерієм Стюдента:

$$t_k = \frac{|M(\Delta)_1 - M(\Delta)_2|}{\sqrt{D(\Delta)_1 + D(\Delta)_2}} \cdot \sqrt{n} \quad (2.20)$$

Якщо величина критерію $t_{k\sigma} \geq 3$ то гіпотеза рівності середніх квадратичних відхилень відкидається і технологічна операція вважається ефективною, а при $t_{k\sigma} < 3$ гіпотеза приймається і технологічна операція вважається неефективною.

Таблиця 2.4 – Значення параметрів ефективності технологічних операцій

Позначення параметра	t_{k12}	t_{k23}	t_{k13}	t_{s12}	t_{s23}	t_{s13}
Числове значення	0.688	3.63	3.28	1.21	3.4	3.12

Використавши (2.7) отримали значення $t_{k\sigma 2}$ і $t_{k\sigma 3} < 3$, які свідчать, що вплив напівчистового розточування і фінішного чистового розточування на середнє квадратичне відхилення від круглості по відношенню до отриманого такого ж параметра на першій технологічній операції – чорнове розточування – не суттєвий.

Встановивши, за середнім квадратичним відхиленням від круглості досліджуваних поверхонь сформованих 2-ою і 3-ою технологічними операціями не суттєвий вплив на цю характеристику точності форми поперечного перерізу внутрішньої поверхні гідроциліндрів можна стверджувати, що технологічна спадковість за точністю форми після другої технологічної операції присутня, після третьої технологічної операції – відсутня.

Виявлено, що перша і третя технологічна операція суттєво впливають ($t_{k\sigma 2}$ і $t_{k\sigma 3} > 3$) на величину математичного сподівання відхилення від круглості тобто ϵ , з точки зору забезпечення точності форми, ефективними. Оцінка суттєвості відмінності математичного сподівання відхилень від круглості

внутрішніх циліндричних поверхонь гідроциліндрів сформованих після реалізації другої технологічної (напівчистового розточування), не підтвердило підвищення точності форми поперечного перерізу внутрішньої циліндричної поверхні гідроциліндрів, тобто технологічна спадковість негативна.

2.2 Оптимізація технологічного процесу формування поверхні гідроциліндра на основі аналізу топографії її мікрорельєфу утвореного на різних операціях

До поверхонь гільз гідроциліндрів, ставляться високі вимоги з точності форми, а саме – відхилень від прямолінійності в повздовжньому та відхилень від круглості в поперечному перерізі. Такі вимоги до гідроциліндрів зумовлені тим, що їх експлуатація не допускає перетікання робочої рідини з однієї порожнини в іншу. Технічні вимоги до гідроциліндрів регламентуються ГОСТ 16514-96 [105].

Слід зазначити, що важкі умови експлуатації, агресивне середовище, знакозмінні навантаження високої амплітуди спричиняють спотворення початкового мікрорельєфу робочої поверхні гільзи, що погіршує її експлуатаційні властивості навіть за рівномірного зношення. Проте, гільзам гідроциліндрів, за експлуатаційних умов, як правило притаманна нерівномірність зношування поверхні, внаслідок локалізації процесів тертя. Для гільз гідроциліндрів характерні несправності, які є недопустимими під час експлуатації, частина яких тісно пов'язана із станом поверхні гільзи гідроциліндра, табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Типи несправностей гідроциліндрів зумовлені неоптимальною мікрогеометрією та шорсткістю поверхні, кінематичними та силовими факторами

Типи несправностей	Причини несправностей	Наслідки
Відхилення мікрогеометрії і шорсткості поверхні	Неоптимальна шорсткість робочої поверхні	Зростання коефіцієнту тертя, виникнення надлишкових повздовжніх та поперечних навантажень, зростання інтенсивності зношування.
	Неоптимальна геометрія робочої поверхні	Зростання інтенсивності зношування та швидке зношування, порушення тримких та герметизуючих властивостей.
Експлуатаційн і та кінематичні пошкодження	Недосконала ізоляція направляючих від забруднення	Зростання коефіцієнту тертя між штоком та гільзою гідроциліндра.
	Недосконале змазування поверхонь тертя	Зростання сили тертя та пружних деформацій поза зоною зони тертя. За реверсивного руху це змінює розподіл контактних навантажень та спричиняють додаткове пластичне деформування зони контакту.
	Значна частота зупинок та реверсування	Зростання значень контактних зсувних деформацій у зоні контакту, що спричиняє структурну деградацію матеріалу гільзи.
	Значні відмінності експлуатаційної величини вильоту штока	Зростання деградації матеріалу гільзи гідроциліндра, накопичення мікро- і макродефектів у поверхневому шарі, що зумовлює активацію дифузійної, адсорбційної і хемосорбційної взаємодії поверхні тертя.
Силові фактори	Виникнення неспіввісності штока и гільзи, внаслідок збільшення зазорів у системі «гільза-шток»	Виникнення прогинів/змішень в системі «гільза-шток».
	Виникнення перекосів (технологічних викривлень) штока.	Порушення співвісності системи «гільза-шток», внаслідок чого накопичуються пластичні деформації у стінках гільзи та штоку із наступним заклинюванням штока.

З вищевказаної класифікації помітно, що технологія виготовлення поверхонь гільз гідроциліндра є визначальною для формування мікрогеометрії пари тертя «шток-гідроциліндр». Вона, значною мірою, формує кінетику накопичення втомних мікродфектів та зношення поверхонь тертя. Опосередковано, параметри мікрогеометрії впливають на контактні тиски в приповерхневих шарах гільзи гідроциліндра та температурно-силові умови його експлуатації. Крім того вони визначають вид зношування деталей та можливість утворення задирів, або викришувань стінки гідроциліндра, оскільки є одним з чинників, що забезпечують наявності масляної плівки.

Об'єктом досліджень був гідроциліндр КС-4574.63.900 телескопування (випускання) стріли автомобільного крана КТА-25, що виготовляється на Дрогобицькому заводі автомобільних кранів (Україна) (рис. 2.3). Гідроциліндри виготовляли зі сталі наступного хімічного складу: C = 0.22; Si = 0.10-0.55; Mn=1.60; P=0.035; S=0.035; Al = 0.020, яка має $\sigma_{us} = 570$ МПа; $\sigma_{ys} = 470$ МПа; $\delta = 15$ %.

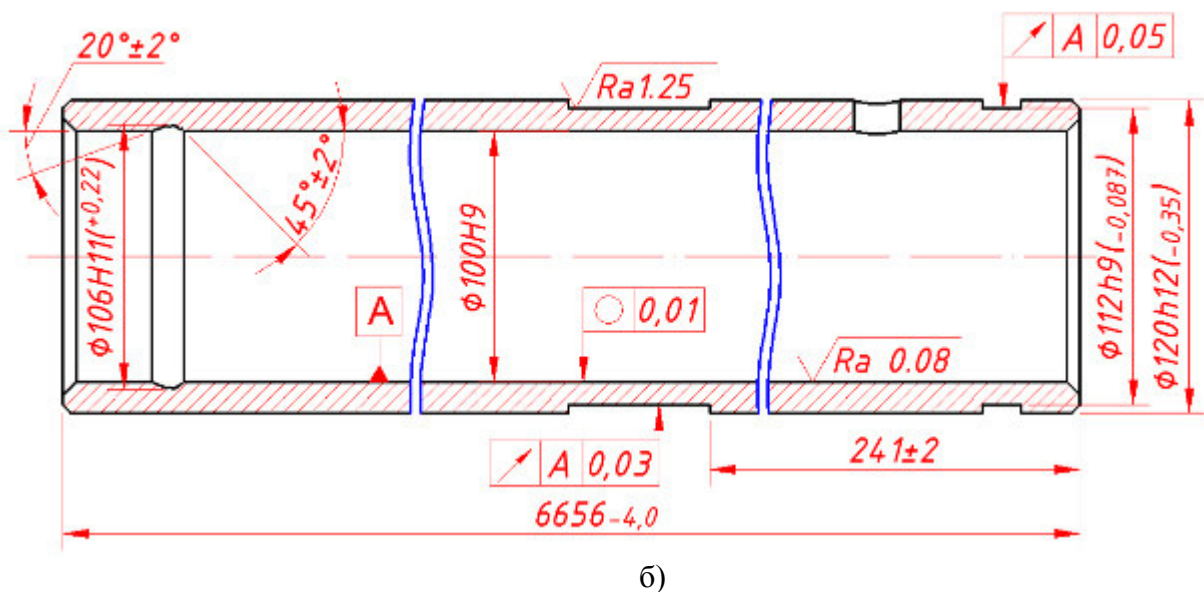


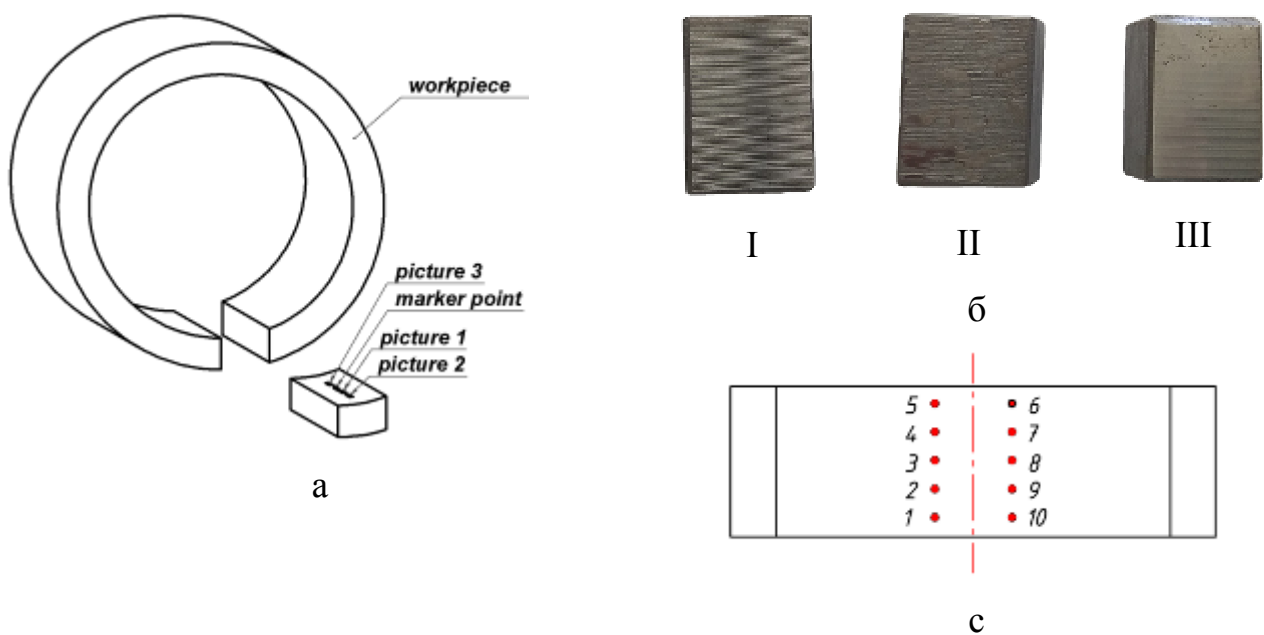
Рисунок 2.7 – Деякі технічні вимоги до гільзи циліндра гідроциліндра плунжерного КС-4574.63.900-03.00 телескопування стріли автомобільного крана виробництва “ДЗАК”

Геометричні параметри гідроциліндра представлені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Загальна характеристика гідроциліндра телескопування стріли автомобільного крана

Номенклатура гідроциліндра	Діаметр поршня, мм	Діаметр штока, мм	Хід поршня, мм	Макс. тиск в гідросистемі, МПа	Маса, кг
КС-4574.63.900-03.00	100	80	6000	25	411,8

Для проведення досліджень було одержано зразки гільзи циліндра, у вигляді циліндричних кілець (рис. 2.8 а), які отримували після виконання кожної із груп технологічних операцій, зокрема чорної обробки, напівчистої обробки і розкатування. Із кожного кільця вирізали фрагмент розміром 20×12 мм (рис. 2.8 б) для дослідження на скануючому інтерференційному мікроскопі білого кольору Zygo NewView 6200 та одержання просторового зображення профілю шорсткості поверхні.



I - після чорного розточування; II - після напівчистого розточування; III - після розкатування

Рисунок 2.8 – Схема вирізання темплетів (а) фотографії поверхні темплетів (б) після різних видів механічної обробки та схема вимірювання твердості їх поверхні (в)

Мікроскоп дозволяє отримувати по три зображення профілю шорсткості поверхні, відповідно до рис. 2.8 а. Шорсткість темплетів контролювали оптичному інтерферометрі моделі NewView 7300 фірми Zygo (США). Твердість вимірювали за методом Роквела (шкала В) на твердомірі TP5006-02. Попереднє навантаження становило 98,07Н, загальне – 980,7Н. Діаметр кульки становив 1,588 мм. Твердість замірялась в десяти точках розмішених з кроком 6 мм. Для оцінювання значень дисперсії твердості використано теорію малої вибірки. Поверхні зразків досліджували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP із системою спектрального мікроаналізу INCA Energy 350.

Таблиця 2.7 – Структура технологічних операцій виготовлення гільзи циліндра на прикладі гільзи гідроциліндра КС-4574.63.900 випускання стріли автомобільного крана КТА-25

№ опер	Назва технол. операцій	К-ть перех одів	Внутрішній діаметр D , мм	Шорсткість поверхні відповідно до тех. документації і Ra , мкм.	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Середнє значення
1	Чорнова обробка	1	Ø94Н11	20				
		1	Ø98,3Н11	10	7,3 6	7,4 8	9,8 4	8,2 2
2	Напівчистова обробка	1	Ø99,3Н11	5				
		1	Ø99,5Н11	5	7,4 4	4,8 6	8,8	7,0 3
3	Фінішна обробка	1	Ø100Н9	0,32	0,1 6	0,1 6	0,2 4	0,1 8

Герметичність з'єднання між манжетою штока гідроциліндра та робочою поверхнею гільзи гідроциліндра забезпечується технологічними операціями оброблення цієї поверхні. Структуру та зміст технологічних операцій виготовлення гільзи гідроциліндра наведено в таблиці 2.7.

Проаналізовано особливості стану поверхні на різних етапах технологічного процесу, шляхом співставлення твердості. Виявлено інтенсивність зміцнення поверхні та дисперсію значень твердості гільзи гідроциліндра після різних технологічних операцій показано в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Значення твердості, HRB (для 10-ти вимірювань) на кожній технологічній операції

№ опер	Назва технол. операцій	Внутрішній діаметр D, мм	Значення твердості, HRB для 10-ти вимірювань									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Чорнова обробка	Ø98,3Н1 1	77	80	77	78	70	77	81	77,5	79,5	82,5
2	Напівчистова обробка	Ø99,5Н1 1	80	75	77	76,5	77	83	85,5	75,5	82,5	83
3	Фінішна обробка	Ø100Н9	91,5	94,0	95,0	94,0	94,5	93,5	94,5	91,5	93,5	94,5

Використавши теорію малої вибірки [20] визначили середнє значення твердості обробленої поверхні зразка після операцій чорнкової обробки $M(\text{HRB})=79.384$ од., та дисперсію складає $D(\text{HRB})=5.479$, напівчистової обробки – $M(\text{HRB})=81.789$ од., дисперсія складає $D(\text{HRB})=6.826$ та фінішної обробки – $M(\text{HRB})=93,806$ од., дисперсія складає $D(\text{HRB})=0,728$.

Таким чином бачимо незначне збільшення твердості та зростання дисперсії їх значень, що свідчить про негативний вплив операцій напівчистової обробки на стабільність фізико-механічних властивостей поверхні.

Фінішна операція чистового розкочування забезпечила необхідні фізико-механічні властивості обробленої поверхні та значно зменшила дисперсію значень твердості поверхні.

Як видно із фотографій дослідних зразків (рис. 2.9) чорнова, а потім й напівчистова операція формують на поверхні гільзи гідроциліндра неоднорідну

структуру (рис. 2.9 в), яку фінішна обробка у вигляді розкочування поверхні загладжує. Це також підтверджують і 3D знімки профілю шорсткості цієї поверхні (рис. 2.10), на яких помітно ділянки із зонами пластичного деформування, що чергуються із ділянками типовими для токарної обробки. Така неоднорідна структура, отримана при токарній обробці може свідчити про неправильно підібрані режими різання, який призводить до утворення наросту і його руйнування під час цієї обробки. Слід також відмітити, що кроковий параметр шорсткості S знаходиться в межах 0,4-0,6 мм, що є оптимальним у відповідності до рекомендацій [269].

За даними електронно-мікроскопічного аналізу поверхонь темплетів кожен етап обробки визначає свої морфологічні особливості морфології поверхні, зокрема:

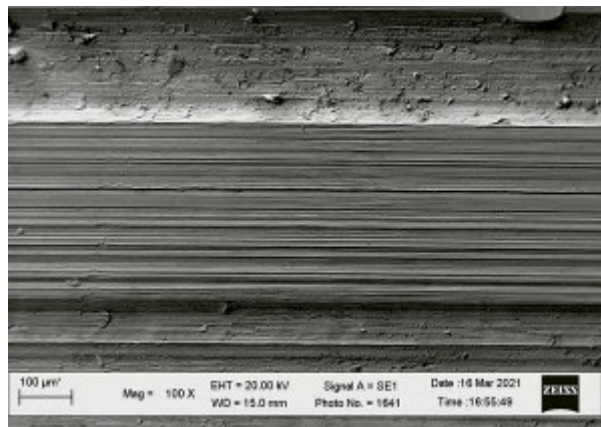
Чорнове точіння, рис. 2.9 а, б – зумовлює формування на поверхні глибоких рисок, які можна розглядати як наслідок переривчастого різання. Нерівномірність рельєфу аналізованої поверхні є негативним фактором, зумовленим вібрацією оброблюваного інструменту, оброблюваної деталі і вузлів верстату, які є причиною зниження якості поверхні оброблених деталей.

Чистова обробка рис. 2.9 в, г – зумовлює формування поверхні із помітним впливом пластичного деформування. На поверхні помітні лускоподібні надриви. Висота цих надривів свідчить про низьку температуру у зоні обробки.

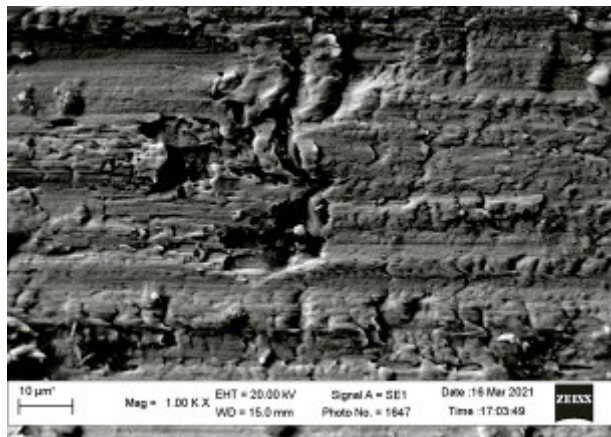
Такий механізм формування поверхні також є свідченням циклічності взаємодії інструменту та поверхні деталі. Пластичне деформування поверхневого шару, спричиняє його зміцнення та структурно-механічну неоднорідність властивостей поверхні на мікрорівні.

Фінішна обробка рис. 2.9 д, е - зумовлена контактом інструменту з оброблюваною поверхнею по вершинах нерівностей, опорна площа яких мала. Поверхня виглядає достатньо рівної, вкритою дрібними одноорієнтованими рисками. Це зумовлено тим, що на поверхні контакту виникали значні тиски,

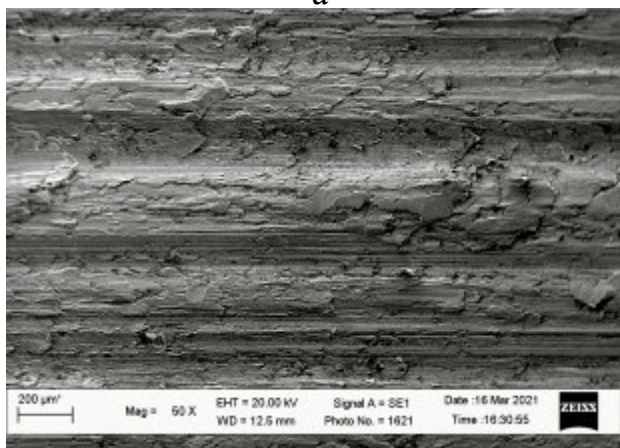
що перевищували межу текучості матеріалу і зумовили інтенсивне пластичне деформування нерівностей, їх загладжування.



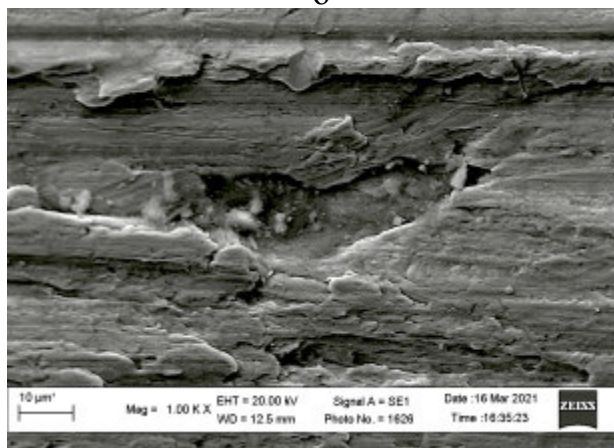
а



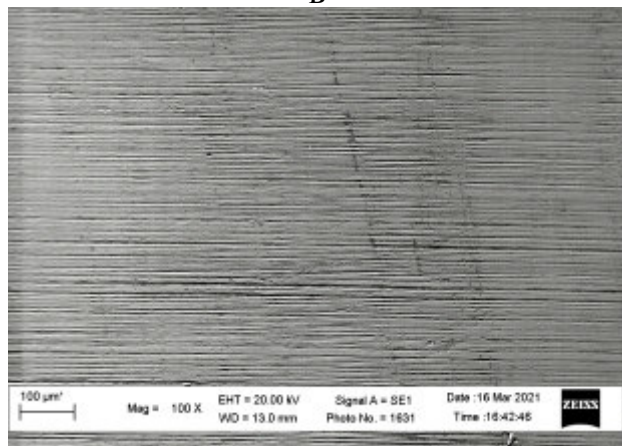
б



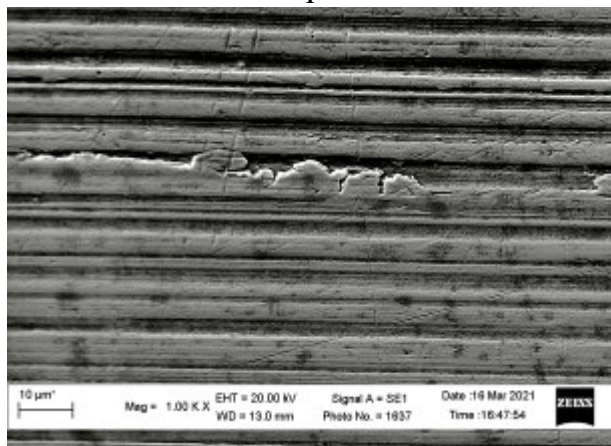
в



г



д



е

а,б - після чорнової обробки; в,г - після чистової обробки; д, е - після фінішної обробки

Рисунок 2.9 – Фотографії поверхні зразків при 100X збільшенні:

У міру вигладжування зростала площа контакту інструменту з оброблюваної поверхнею. За таких умов поверхневий шар металу значно зміцнився, що збільшило опір поверхні пластичному деформуванню, тому значення шорсткості стабілізувалось.

На рис. 2.9 є добре видно, що глибокі канавки отримані в результаті попередніх операцій механічного оброблення не усунуті фінішною операцією розкатування. Крім цього ці дефекти при експлуатації гільзи гідроциліндра будуть локалізованими ділянками зародження експлуатаційних пошкоджень.

3-D профілометрія. Характер взаємодії ріжучої поверхні різця з поверхнею що обробляється наочно відображений на 3-D профілограмах.

Чорнове точіння - на поверхні спостерігаються глибокі «вириви» які містять сходоподібні виступи та западини із достатньо гострими гранями.

Напівчистове точіння - помітно деформовані ділянки поверхні із переходами від невеликих виривів до вигладжених поверхонь.

Фінішна обробка - помітно сліди контрактної взаємодії «інструмент-деталь» в вигляді проекцій «синіх плям», що свідчить про те, що вигладжування виконане з періодичним відривом від оброблюваної поверхні.

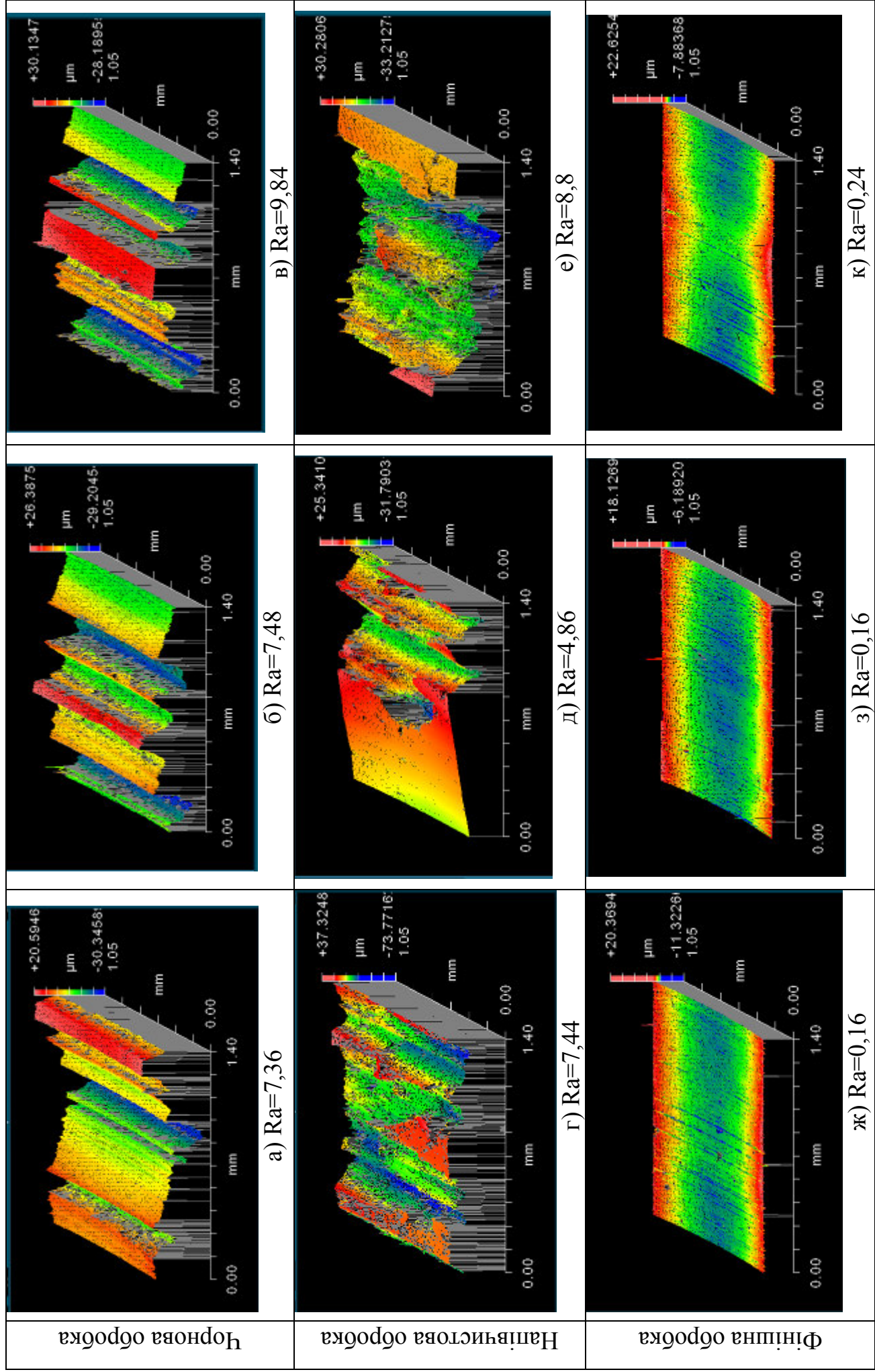


Рисунок 2.10 – 3D фотографії поверхонь дослідних зразків (розмір ділянки 1,4×1,5 мм)

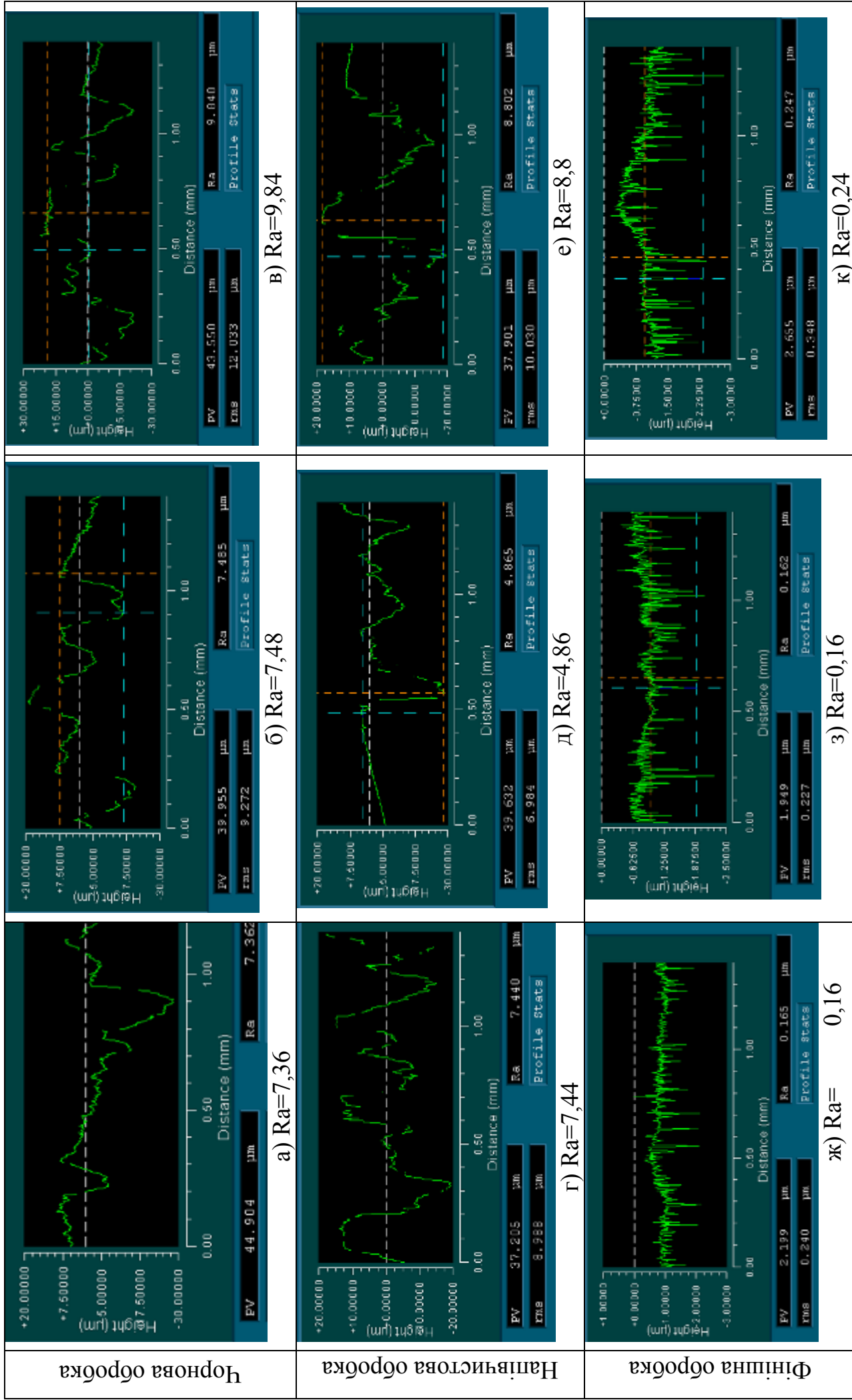
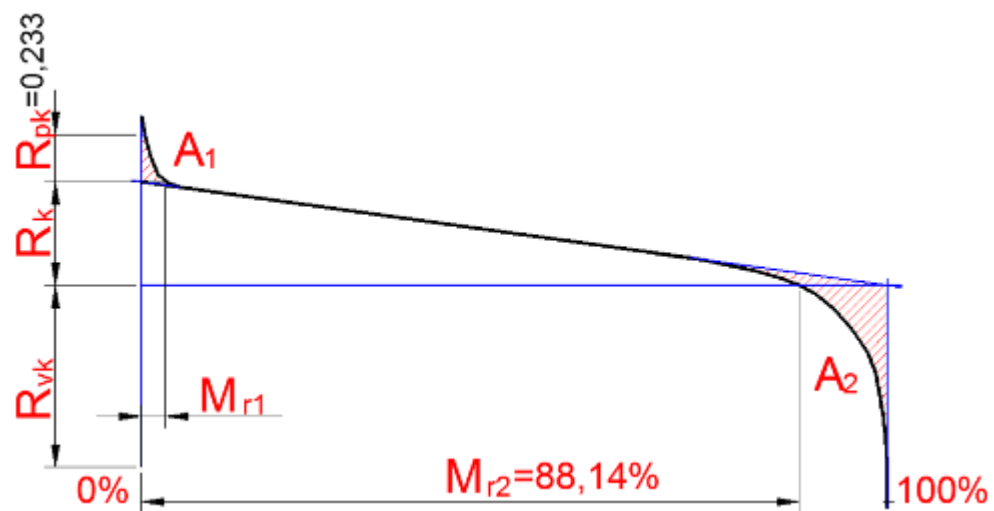


Рисунок 2.11 – Профілограми поверхонь дослідних зразків (розмір ділянки 1,4×1,5 мм)

Таким чином, формування рельєфу дозволяє змінювати рельєф поверхні та його твердість. За оптимальних умов, це забезпечує гарантовану зносостійкість деталі та рівномірність процесу зношування по всіх довжині деталі.

Побудовано діаграму Аббота-Фаєрстоуна (ISO 4287 1996) для поверхні отриманої після фінішної операції (рис. 2.12), якій відповідає профілограма (рис. 2.11 з). Крива описує відношення довжини заповнення матеріалом до оціночної довжини при вираженій у % заданої глибини різання. Одночасне невелике значення параметру R_{pk} та зменшення % значення M_{r1} свідчить про зростання частки матеріалу, що знаходились вище середньої лінії профілю (западини), а це обумовлює значну площу фактичну площу контакту поверхні. Нахил на початку кривої відображає піки профілю, які сприяють інтенсифікації процесу зношування, а нахил в кінці кривої відображає западини профілю, які є резервуарами мастила.



R_{pk} – висота зменшеного виступу; R_k – глибина серцевини профілю;
 R_{vk} – глибина зменшеної западини; M_{r1} – доля матеріалу у відсотках, відділена лінією, яка розділяє виступи від серцевини профілю; M_{r2} – доля матеріалу у відсотках, відділена лінією, яка розділяє западини від середини профілю

Рисунок 2.12 – Діаграма Аббота-Фаєрстоуна для внутрішньої циліндричної поверхні зразка отриманого після фінішної операції розкатування

Стандарт [105] передбачає залежність для визначення об'єму мастила, який буде отримуватись на поверхні

$$V_o = \frac{R_{vk}(100 - M_{r2})}{200}. \quad (2.21)$$

де V_o – об'єм, який містить мастило, $\text{мм}^3/\text{см}^2$.

Розрахуємо об'єм мастила, який буде отримуватись на поверхні гільзи гідроциліндра використовуючи значення отримані із діаграми (рис. 2.12).

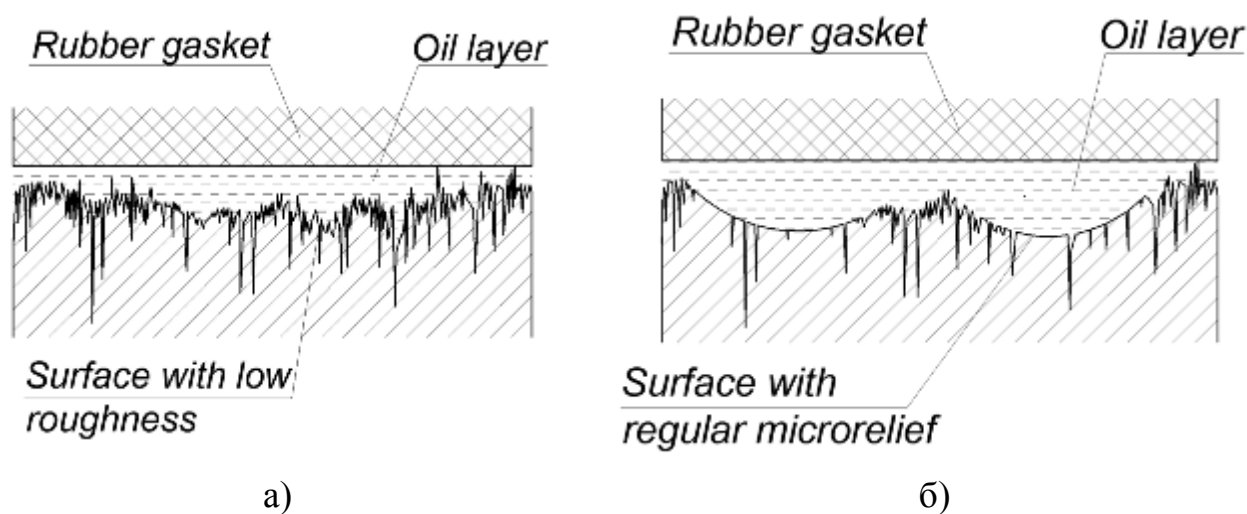
$$V_o = \frac{0,94(100 - 88,14)}{200} = 0,05574 \text{ мм}^3/\text{см}^2.$$

Граничне значення згідно з [105] становить $0,05 \text{ см}^3/\text{м}^2$.

Максимальне значення мастила, яке буде утримуватись на поверхні гільзи гідроциліндра задовольняє умови наведені в стандарті [105], однак воно є близьким до граничного. З практичної точки зору це означає, що через певний період, в залежності від умов експлуатації, обсяг мастила, яке утримується на поверхні гільзи стане меншим ніж потрібно щоб забезпечити нормальні умови експлуатації.

Очевидно, що отримана структура та параметри якості внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра є причиною зменшення ресурсу його роботи через втрату герметичності з'єднання між манжетою штока і робочою поверхнею гільзи гідроциліндра. Причому слід відмітити, що якісні показники поверхні, зокрема параметри шорсткості, точності та фізико-механічні параметри поверхні є досить високими і їх значення задовольняють технічні вимоги, що ставляться до робочих поверхонь гільз гідроциліндрів. Однак дані параметри не є оптимальними для спряження деталей типу метал-рези́на, які здійснюють відносні переміщення.

На рис. 2.13. зображено схеми взаємодії поверхонь отриманих: а) базовою технологією, яка забезпечує низькі параметри шорсткості, але містить значну кількість мікрodefektів; б) з формуванням регулярного мікрорельєфу.



а) поверхня із низькою шорсткістю; б) поверхня з регулярним мікрорельєфом

Рисунок 2.13 – Схеми взаємодії поверхонь:

Взаємодія поверхні із меншим значенням шорсткості (рис.2.13 а) із гумовим ущільненням штока гідроциліндра призведе до умов напівсухого тертя, оскільки ця поверхня не здатна утримувати мастильну плівку значної товщини. Формування умов канавок регулярного мікрорельєфу на робочій поверхні (рис. 2.13 б) дозволить забезпечити необхідні для нормальної роботи умови тертя між поверхнею гідроциліндра та ущільненням штока.

Таким чином, проведені дослідження показують те, що технологічна операція напівчистового розточування хоча і зменшує середнє значення шорсткості поверхні Ra , однак значно погіршує параметр точності – відхилення від круглості. Високі значення відхилення від круглості не усуваються фінішною технологічною операцією [20]. Крім цього при даних режимах оброблення утворюється неоднорідна структура поверхні.

За результатами експериментальних досліджень [269] виявлено, що висотні Ra та крокові S_m параметри шорсткості поверхні [110] отримані після

напівчистового розточування задовольняють рекомендовані для даного виду спряження. Однак неоднорідна структура матеріалу поверхні гільзи, отримані на цій операції та глибокі риси, які спостерігаються на 3D фотографіях поверхні після фінішної операції розкатування, при експлуатації гільзи будуть локальними дефектами, які з часом призведуть до утворення задирів та втрати герметичності з'єднання.

Встановлено, що числове значення параметра шорсткості Ra середнього квадратичного відхилення шорсткості не може бути однозначною оцінкою якості поверхні, оскільки його зменшення не завжди буде наслідком покращення експлуатаційних властивостей поверхні. Додатково, якість поверхні на фінішній операції оцінено за кривою Аббота-Фаєрстоуна.

Покращення якості та експлуатаційних властивостей внутрішніх циліндричних поверхонь гільз гідроциліндрів досягнуто зміною технологічних операцій, зокрема на операції напівчистового розточування забезпечено: параметр шорсткості поверхні в межах Ra 6,3-8 мкм та кроковий $S=0.4-0.6$ мм та однорідну структуру поверхні.

В якості фінішної операції використано операцію вібраційного обкочування із формуванням регулярного мікрорельєфу IV виду (сітчастого мікрорельєфу), який забезпечує утворення на робочій поверхні трибопари «шток-гільза гідроциліндра» плівки мастильної рідини заданої величини. Ця рекомендація узгоджується із результатами досліджень наведеними у роботі [70].

2.3 Імовірнісно-статистичний метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні сформованої точінням

Одним із найважливіших показників якості обробленої поверхні є її шорсткість, яка у значній мірі забезпечує експлуатаційні властивості окремих деталей механізмів та машин.

Для кількісної оцінки шорсткості існуючими стандартами передбачені відповідні параметри, зокрема: висота нерівностей профілю за десятьма точками – R_z і середнє арифметичне відхилення профілю – R_a . Із всіх конструктивно-геометричних і технологічних параметрів оброблюваної деталі і металорізального інструмента при точінні, найбільший вплив на R_z і R_a має подача s . При чистовому обробленні різцем з радіусом r при його вершині, коли r більший від глибини різання t виходячи геометричної моделі величину R_z можна подати залежністю $R_z \approx s^2/8r$. З цього випливає, що функція $R_z = f(s)$ монотонна і має параболічний характер. Максимальний вплив s на R_z або R_a підтверджено цілим рядом емпіричних формул [157], у яких значення показника степеня при s максимальне.

Враховуючи те, що параметри R_z і R_a формуються в результаті одночасної дії багатьох змінних у часі факторів, логічно прийняти, що ці параметри будуть величинами випадковими. Тому оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні сформованої точінням необхідно здійснювати у імовірнісному аспекті.

При дослідженні впливу s на R_a і R_z як суттєвий недолік можна вважати те, що не враховувалась стохастичність подачі s , а також і те, що величини R_a і R_z внаслідок дії при їх формуванні значної кількості факторів [133, 20] будуть величинами випадковими і для їх оцінки необхідно використовувати імовірнісний підхід.

Експериментальні дослідження впливу s на R_a здійснено для матеріалів двох груп сплавів: класу Fe-C, зокрема: сталі 45, сталі 30ХГСА, чавуну КЧ30-6 і кольорових сплавів, зокрема: сплаву алюмінію і кремнію – силумін АЛ4; сплаву алюмінію, міді і марганцю термічно оброблений – дюралюміній Д16Т;

сплав міді і свинцю – латунь ЛС ЛС63-3. Сталі 45 і 30ХГСА перед обробленням піддавали нормалізації, а чавун КЧ30-6 - відпалу.

Хімічний склад матеріалів і їх фізико-механічні властивості подані відповідно у таблицях 2.9 і 2.10.

Таблиця 2.9 – Хімічний склад матеріалів дослідних зразків

Марка матеріалу	Вміст, %						
	C	Si	Mn	Cr	Mg	Cu	Pb
Сталь 45	0,42-0,30	0,17-0,37	0,50-0,80	–	–	–	–
30ХГСА	0,28-0,34	0,10-1,20	0,80-1,10	0,80-1,10	–	–	–
КЧ30-6	3,0-3,3	1,3-1,7	0,8-1,2	0,3	–	–	–
АЛ4	–	8-10,5	0,2-0,5	–	0,17-0,3	–	–
Д16Т	–	0,5	0,3-0,9	–	1,3-1,8	3,8-4,9	–
ЛС63-3	–	–	–	–	–	62,0-65,0	2,4-3,0

Таблиця 2.10 – Фізико-механічні властивості матеріалів дослідних зразків

Характеристика Матеріал	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	НВ, МПа
Сталь 45	360	640	16	40	175
30ХГСА	850	900	10	45	229
КЧ30-6	–	300	6	–	130
АЛ4	180	280	3	–	70
Д16Т	–	460	8	–	42
ЛС63-3	–	300-650	5	–	140

Прийняті позначення: σ_T – границя текучості; σ_B – границя тимчасового опору; δ_5 , % – відносне видовження після розриву; ψ , % – відносне звуження після розриву; НВ – твердість.

Дослідний зразок із сталі 30ХГСА оброблювався на модернізованому токарному верстаті з числовим програмним керуванням моделі СТЛЛ-100 на

Волочиському машинобудівному заводі «Мотор-Січ».

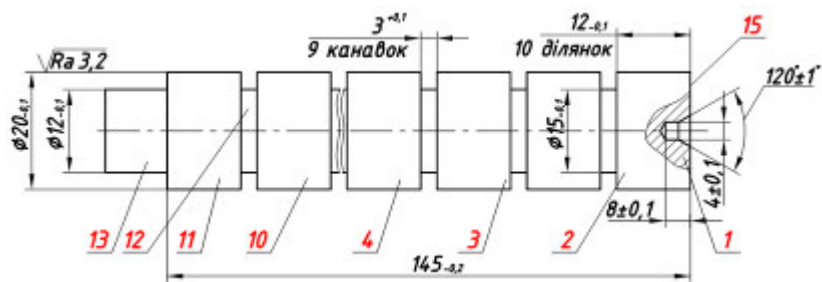


Рисунок 2.14 – Визначення параметрів шорсткості на профілометрі моделі 296

Суть запропонованого ймовірно-статистичного методу [215] оцінювання впливу s на R_a , полягає у наступному.

Використовують дослідний зразок 1 (рис. 2.15) у вигляді циліндра постійного діаметра D з рівномірно по його довжині розміщеними ділянками 2, 3,...11, які розділені між собою канавками 12 шириною 3 мм, з центровим отвором 14 на торці 15. На одному з кінців зразка розміщена ступень меншого діаметра 13 для закріплення у патроні 16 токарного верстата (на рисунку не показано). Застосовують інструмент – різець 17, з постійними геометричними і конструктивними параметрами.

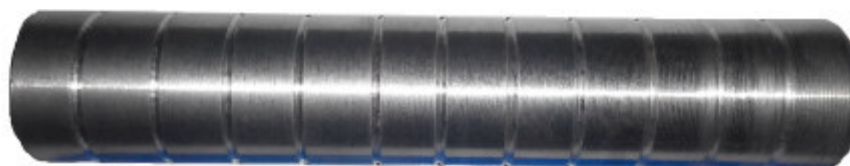
На першому етапі дослідний зразок 1 встановлюють і закріплюють у токарному патроні 16 токарного верстату і підпирають заднім центром 18. (рис. 2.16 а). Здійснюють перший прохід з постійними елементами режиму різання: глибиною – t_n ; подачею – s_n ; швидкістю різання – V_n , які відповідають напівчистовому обробленню.



а)



б)



в)



г)



д)

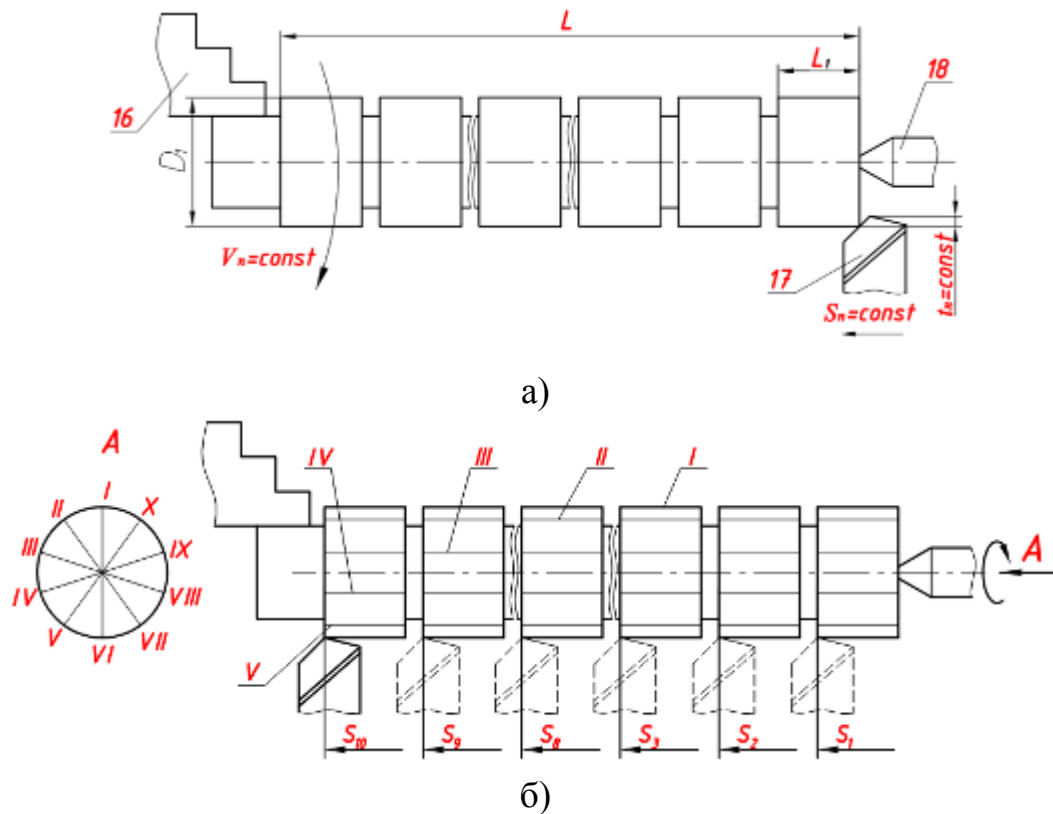


е)



є)

Рисунок 2.15 – Креслення та загальні вигляди дослідних зразків для дослідження впливу подачі на шорсткість обробленої циліндричної поверхні



а) схема реалізації напівчистового проходу; б) схема чистового проходу та розміщення трас для вимірювання параметра R_a

Рисунок 2.16 – Дослідний зразок і схеми технологічних напівчистового і чистового переходів:

На другому етапі (рис. 2.16. б) встановлюють постійні елементи режиму різання глибину – t_c , і швидкість різання – V_c , як для чистового оброблення. Визначають розрахункову частоту обертання шпинделя $n_p = 1000 \cdot V_r / \pi D$, коректують її за паспортом верстата n_d і встановлюють її на верстаті. Здійснюють процес різання на кожній із ділянок заготовки при змінних подачах: $s_1, s_2, s_3, \dots, s_9, s_{10}$.

Значення змінних подач s_q як випадкових величин на вибраному токарному верстаті 16К20 визначають за методикою поданою у роботі [156]. Після оброблення статистичних рядів подач їх паспортні значення та характеристики розсіювання подані у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Паспортні значення та характеристики розсіювання подач токарно-гвинторізного верстату моделі 16К20

Паспортні значення, мкм/об	50	60	75	90	100	125	150	175	200
Середнє значення, мм/об	46,3	59,8	70,5	81,5	94,9	120,0	144,1	167,5	193,9
Дисперсія, (мм/об) ²	8,46	20,15	11,64	21,18	27,8	29,08	34,55	52,15	60,78
Середнє квадратичне відхилення, мм/об	2,91	4,49	3,41	4,60	5,27	5,39	5,87	7,22	7,80

На третьому етапі на кожній із десяти трас ($i= I, II, III...X$) поверхні кожної j -ї ділянки ($j = \overline{1,10}$), які отримані при чистовому точінні з відповідними середніми значеннями подач $\bar{s}_j (j = \overline{1,10})$ визначають значення $r_{k_j} (k = \overline{1,10})$ середні арифметичні відхилення профілю R_{a_j} і ці значення приймають як випадкові величини.

Із отриманих значень r_{k_j} для кожної ділянки дослідного зразка формують статистичні ряди і за критерієм Греббса [157] перевіряють їх на однорідність. У випадку виявлення значень, які різко виділяються, їх відкидають і додатково вводять значення r_{k+1_j} , отримане на окремій додатковій трасі j -ї ділянки та повторно перевіряють статистичні ряди на однорідність.

На четвертому етапі, використавши метод оцінювання закону розподілу за малою вибіркою [20], знайдена щільність розподілу $f(r_{a_j})$ ймовірностей випадкової величини R_{a_j} для кожної j -ї ділянки ($j = \overline{1,10}$), яка має вигляд

$$f(r_{a_j}) = \frac{1}{b_j - a_j} \prod_{k=1}^n c_{k_j} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r - r_{k_j}}{\sigma_j} \right)^2 \right] \prod_{i=k}^n c_{i_j}, \quad (2.22)$$

де $[a_j; b_j]$ – проміжок зміни експериментальних значень r_{k_j} величини R_{a_j} ;
 $a_j = r_{k_j \min}$, $b_j = r_{k_j \max}$ ($r_{k_j \min}$, $r_{k_j \max}$ – відповідно найменше і найбільше значення
серед r_{k_j} ($k = \overline{1, n}$)); n – кількість значень R_{a_j} (розмір вибірки);

$$c_{k_j} = \frac{1}{1 + \Phi(z_{k2}) - \Phi(z_{k1})}, \quad z_{k1} = \frac{a_j - r_{k_j}}{\sigma_j}, \quad z_{k2} = \frac{b_j - r_{k_j}}{\sigma_j}; \quad (2.23)$$

$\sigma_j = \frac{b_j - a_j}{6}$ – стандартний відхил випадкової величини R_{a_j} ;

$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – функція Лапласа.

Зазначимо, що під час знаходження щільності розподілу випадкової величини R_{a_j} , враховано те, що розподіл імовірностей k_j -го дослідів є розподілом імовірностей одиничного експерименту. Тому за розподіл імовірностей k_j -го дослідів прийнята щільність нормального розподілу з математичним сподіванням r_{k_j} і стандартним відхилом σ_j , який вважаємо однаковим для всіх дослідів.

Для знайденої щільності $f(r_{a_j})$ розподілу випадкової величини R_{a_j} формули для обчислення її математичного сподівання $M(R_{a_j})$ і дисперсії $D(R_{a_j})$ відповідно мають вигляд

$$M(R_{a_j}) = \frac{a_j + b_j}{2} \prod_{k=1}^n c_{k_j} + \sum_{k=1}^n \prod_{i=k}^n c_{i_j} \left\{ \frac{\sigma_j}{\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{z_{k1}^2}{2}} - e^{-\frac{z_{k2}^2}{2}} \right) + r_{k_j} [\Phi(z_{k2}) - \Phi(z_{k1})] \right\} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned}
D(R_{a_j}) = & \frac{a_j^2 + a_j \cdot b_j + b_j^2}{3} \prod_{k=1}^n c_{k_j} + \\
& + \sum_{k=1}^n \prod_{i=k}^n c_{i_j} \left\{ \frac{\sigma_j}{\sqrt{2\pi}} \left[\left(\sigma_j z_{k1} + 2r_{k_j} \right) \cdot e^{-\frac{z_{k1}^2}{2}} - \left(\sigma_j z_{k2} + 2r_{k_j} \right) \cdot e^{-\frac{z_{k2}^2}{2}} \right] + \left(\sigma_j^2 + r_{k_j}^2 \right) \left[\Phi(z_{k2}) - \Phi(z_{k1}) \right] \right\} - \\
& - \left[M(R_{a_j}) \right]^2.
\end{aligned}
\tag{2.25}$$

Середнє квадратичне відхилення у цьому випадку буде дорівнювати

$$\sigma(R_{as_q}) = \sqrt{D(R_{as_q})}.
\tag{2.26}$$

На п'ятому етапі розраховують критерії Стюдента t_k для параметра $M(R_a)$ і Фішера F для дисперсій $D(R_a)$ і перевіряють на наявність істотної відмінності [157].

На шостому етапі прийнявши $M(R_{a_j}) \approx R_{a_j}$, визначають максимальне значення шорсткості за формулою $R_{max} = \bar{R}_{a_j} + 3\sigma(R_{a_j})$.

Здійснивши етапи від першого до шостого відносно значень параметра шорсткості R_{as_q} , використавши критерії Стюдента та Фішера оцінюють істотність впливу подачі на шорсткість поверхні отриманої в процесі різання.

Процес різання здійснювався на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16К20 у лабораторії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя для всіх дослідних зразків окрім дослідного зразка із сталі 30ХГСА. Дослідний зразок із сталі 30ХГСА оброблювався на модернізованому токарному верстаті з числовим програмним керуванням моделі СТЛ-100 на Волочиському машинобудівному заводі корпорації «Мотор-Січ».

Точіння здійснювали прохідно-упорними різцями. Ріжуча частина різця для оброблення сталей і кольорових сплавів була із твердого сплаву Т15К6, а для чавуну — із твердого сплаву ВК6М. Геометричні параметри різців: головний кут в плані різця $\varphi = 90^\circ \pm 30'$, допоміжний кут в плані різця $\varphi' = 15^\circ \pm 30'$, головний

передній кут $\gamma = 10^\circ \pm 15'$, головний задній кут $\alpha = 10^\circ \pm 15'$, кут нахилу головного різального леза $\lambda = 0^\circ$, радіус при вершині $r = 0,2$ мм.

Режими оброблення: на напівчистовому переході глибина різання $t_n = 0,7$ мм, на чистовому – $t_r = 0,4$ мм; швидкість різання для сталей та чавунів – $V = 100$ м/хв; для кольорових сплавів – $V = 150$ м/хв. Процес різання проводився без використання змащувально-охолоджуючих рідин.

Всі ділянки дослідних зразків окрім зразка із сталі 30ХГСА були оброблені з подачами, які відповідали середнім значенням відповідних паспортних подач поданих в таблиці 2.11, а ділянки зразка із сталі 30ХГСА були оброблені з наступними подачами (мкм/об) 20; 30; 50; 60; 70; 80; 88; 100; 125; 150.

Після оброблення всіх ділянок дослідних зразків на їх поверхнях позначали рівномірно розміщені по колу 10 трас і на кожній з них, за допомогою профілометра моделі 296, визначали значення параметра шорсткості — середнє арифметичне відхилення профілю R_a . Отже, на кожній ділянці дослідного зразка обточеного з певною подачею отримували десять значень параметра R_a , які приймали як випадкові величини з нормальним законом розподілу.

За формулами (2.23) і (2.24) визначали відповідно вибіркові середні значення \bar{R}_{asq} і вибіркові дисперсії $D(R_{asq})$. За критеріями Стюдента – t_k і Фішера – F , [6] оцінювали істотність відмінностей між середніми значеннями \bar{R}_{as1} і \bar{R}_{as2} , \bar{R}_{as2} і \bar{R}_{as3} , ... \bar{R}_{asq-1} і \bar{R}_{asq} та дисперсіями $D(\bar{R}_{as1})$ і $D(\bar{R}_{as2})$, $D(\bar{R}_{as2})$ і $D(\bar{R}_{as3})$, ... $D(\bar{R}_{asq-1})$ і $D(\bar{R}_{asq})$. Враховуючи те, що технологічні процеси згідно з [258] з $K_p \leq 0,2$ для виробничих умов можуть бути признані стабільними, то отримані значення коефіцієнтів варіації, що подані у таблицях 2.12, 2.13 і 2.14 підтверджують стабільність процесу формування шорсткості.

Опрацьовані результати отриманих експериментальних даних для матеріалів дослідних зразків подані у таблицях 2.12, 2.13 і 2.14. Порівняння вибіркових характеристик певної ділянки дослідного зразка здійснювалось з вибірковими характеристиками, отриманими на суміжній ділянці при

попередній істотно меншій подачі. Статистичні ряди параметра шорсткості R_a при різних подачах наведені в додатку 7.

Таблиця 2.12 – Характеристики розсіювання величини R_a , розрахункові значення критеріїв Стюдента t_p , Фішера F_p та коефіцієнтів варіації K_v для сталі 45 і чавуну КЧ 30-6

Параметр	Паспортні значення подач – чисельник									
	Вибіркові середні значення подач – знаменник, мкм/об									
	50 46,3	60 59,7	75 70,5	90 81,5	100 94,9	125 120	150 144	175 167	200 194	250 230
Чавун КЧ 30-6										
\bar{R}_a , мкм	4,21	4,13	3,67	3,57	3,41	3,47	3,68	4,37	5,18	5,94
$D(R_a)$, мкм ²	0,005	0,006	0,017	0,005	0,020	0,021	0,065	0,021	0,018	0,005
$R_{a\max}$, мкм	4,422	4,362	4,061	3,782	3,834	3,905	4,445	4,805	5,582	6,152
t_p	–	2,30	10,88	18,92	15,18	13,85	6,05	21,71	10,89	51,14
Істотність зміни	–	–	–	–	–	–	+	+	+	+
F_p	–	1,32	3,62	1,19	4,26	4,47	13,83	4,47	38,72	1,19
Істотність зміни	–	–	–	–	–	–	+•	+•	+•	–•
K_v	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,04	0,07	0,03	0,07	0,01
Сталь 45										
\bar{R}_a , мкм	1,38	0,99	0,75	0,93	1,08	1,36	1,67	2,39	2,54	3,85
$D(R_a)$, мкм ²	0,039	0,010	0,029	0,025	0,011	0,044	0,032	0,015	0,037	0,11
$R_{a\max}$, мкм	1,972	1,29	1,261	1,404	1,395	1,989	2,207	2,757	3,117	4,845
t_p	–	5,29	7,24	5,34	4,02	0,21	3,27	6,97	12,62	19,2
Істотність зміни	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+
F_p	–	3,9	1,34	1,56	3,55	1,13	1,22	3,85	1,05	2,82
Істотність зміни	–	+	–•	–•	+•	–•	–•	+•	–•	–•
K_v	0,14	0,10	0,23	0,17	0,10	0,15	0,11	0,16	0,08	0,09

При цьому прийняті такі позначення: +< – істотне зменшення вибіркового середнього; >+ – істотне збільшення вибіркового середнього; о – зміна

вибіркового середнього неістотна; – • зміна вибірових дисперсій неістотна;
+ • зміна вибірових дисперсій істотна.

Таблиця 2.13 – Характеристики розсіювання величини R_a , розрахункові значення критеріїв Стюдента t_p , Фішера F_p та коефіцієнтів варіації K_p для сталі 30ХГСА

Параметр	Паспортні значення подач, мкм/об									
	20	30	50	60	70	80	88	100	125	150
\bar{R}_a , мкм	2,44	1,52	1,44	1,58	1,59	1,72	2,38	2,54	3,84	4,66
$D(R_a)$, мкм ²	0,0018	0,0066	0,0035	0,0039	0,0080	0,05	0,0022	0,0380	0,0032	0,0220
R_{amax} , мкм	2,567	1,764	1,617	1,767	1,858	2,391	2,521	3,125	4,01	5,105
t_p	–	30,11	41,21	34,17	25,76	10,28	1,1	1,5	59,4	43,17
Істотність зміни	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+
F_p	–	3,67	1,94	2,17	4,44	27,78	1,5	21,11	1,78	12,22
Істотність зміни	–	+ •	– •	– •	+ •	+ •	– •	+ •	– •	+ •
K_v	0,02	0,05	0,04	0,04	0,06	0,13	0,01	0,08	0,01	0,03

Таблиця 2.14 – Характеристики розсіювання величин R_a , розрахункові значення критеріїв Стюдента t_p , Фішера F_p та коефіцієнтів варіації K_p для кольорових сплавів при певних значеннях подач s

Параметр	Паспортні значення подач – чисельник									
	Вибіркові середні значення подач – знаменник, мкм/об									
	$\frac{50}{46,3}$	$\frac{60}{59,7}$	$\frac{75}{70,5}$	$\frac{90}{81,5}$	$\frac{100}{94,9}$	$\frac{125}{120}$	$\frac{150}{144}$	$\frac{175}{167}$	$\frac{200}{194}$	$\frac{250}{230}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Дюралюміній Д16Т										
\bar{R}_a , мкм	1,91	2,19	2,67	2,83	2,84	3,21	3,87	5,27	6,03	7,19

$D(R_a)$, мкм ²	0,021	0,011	0,007	0,008	0,010	0,013	0,020	0,015	0,022	0,043
R_{amax} , мкм	2,345	2,505	2,921	3,098	3,14	3,552	4,294	5,637	6,475	7,812
t_p	–	4,19	13,02	15,68	15,33	16,27	25,63	23,81	59,17	62,26
Істотність зміни	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+
F_p	–	1,91	2,88	2,63	2,1	1,62	1,05	7,38	1,05	2,05
Істотність зміни	–	-	-	-	-	-	-	+	-	-
K_v	0,07	0,05	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,07	0,02	0,03
Латунь ЛС63-3										
\bar{R}_a , мкм	2,214	2,36	2,57	2,98	3,55	4,54	5,14	5,89	7,85	–
$D(R_a)$, мкм ²	0,019	0,009	0,024	0,007	0,007	0,079	0,058	0,096	0,088	–
R_{amax} , мкм	2,628	2,645	3,035	3,231	3,801	5,383	5,862	6,82	8,74	–
t_p	–	0,92	2,17	4,82	8,43	12,78	16,71	19,65	26,75	–
Істотність зміни	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–
F_p	–	24,07	9,13	25,47	30,42	2,77	3,78	2,28	1,21	–
Істотність зміни	–	+	+	+	+	-	+	-	-	–
K_v	0,21	0,04	0,06	0,03	0,02	0,06	0,05	0,05	0,05	–
Силумін АЛ4										
\bar{R}_a , мкм	1,47	1,54	2,03	2,23	2,44	2,74	3,09	3,73	4,56	5,18
$D(R_a)$, мкм ²	0,023	0,055	0,016	0,033	0,025	0,021	0,028	0,017	0,020	0,041
R_{amax} , мкм	1,925	2,244	2,409	2,775	2,914	3,175	3,592	4,121	4,984	5,787
t_p	–	0,06	4,12	4,21	8,69	11,06	11,19	13,3	18,52	15,85
Істотність зміни	–	–	+	+	+	+	+	+	+	+
F_p	–	1,62	1,22	2,39	5,52	6,57	4,93	1,23	1,45	2,97
Істотність зміни	–	-	-	-	+	+	+	-	-	-
K_v	0,29	0,23	0,20	0,26	0,06	0,05	0,06	0,11	0,09	0,12

На рисунках 2.17, 2.18 наведено побудовані за експериментальними даними, графічні залежності впливу подачі s на параметр шорсткості R_a .

Використавши програмне забезпечення OrginPro 8, отримали аналітичні залежності, які описують залежність шорсткості поверхні експериментальних

зразків від подачі. Для сплавів Fe-C залежність шорсткості поверхні від подачі подана у вигляді системи аналітичних залежностей:

$$\text{для сталі 45 } R_{a \max} = \begin{cases} 0,0472 \cdot s^{-1,208} & 0,05 \leq s \leq 0,075 \\ 0,597(1+s)^{9,9} & 0,075 \leq s \leq 0,25 \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\text{для чавуну КЧ 30-6 } R_{a \max} = \begin{cases} 5,57(1+s)^{-4,714} & 0,05 \leq s \leq 0,09 \\ 2,573 \cdot (1+s)^{4,199} & 0,09 \leq s \leq 0,25 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\text{для сталі 30 ХГСА } R_{a \max} = \begin{cases} 3,347(1+s)^{-16,647} & 0,02 \leq s \leq 0,05 \\ 0,864(1+s)^{12,838} & 0,05 \leq s \leq 0,15 \end{cases} \quad (2.29)$$

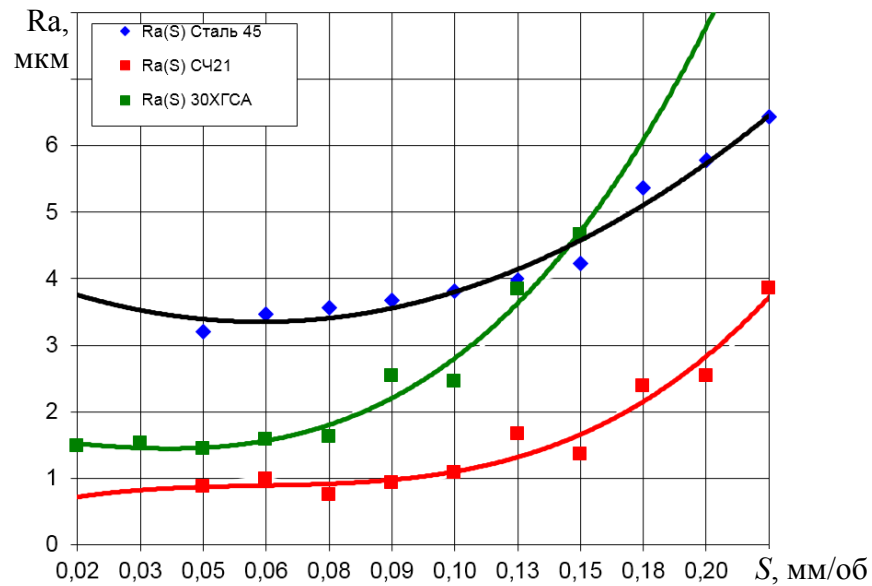
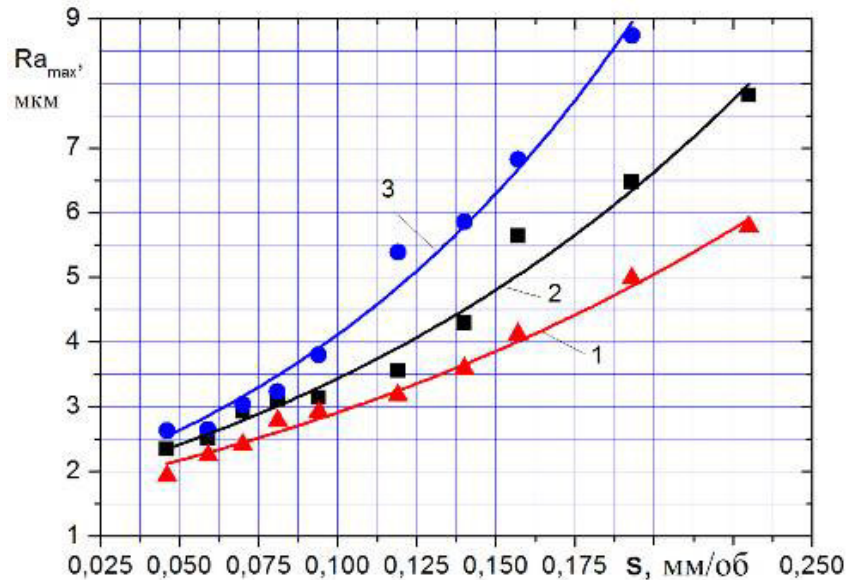


Рисунок 2.17 – Залежність вибіркового середнього параметра шорсткості \bar{R}_a від подачі s для сплавів Fe-C



1 – силумін АЛ4 $R_{a\max} = 1,594(1+s)^{6,321}$;

2 – дюралюміній Д16Т $R_{a\max} = 1,673(1+s)^{7,553}$;

3 – латунь ЛС63-3 $R_{a\max} = 1,655(1+s)^{9,56}$

Рисунок 2.18 – Залежність вибіркового середнього параметра шорсткості \bar{R}_a від подачі s для кольорових сплавів:

Збільшення подачі від 0,05 до 0,25 мм/об при обробленні сталі 45 та чавуну КЧ30-6 і збільшення подачі від 0,02 до 0,15 мм/об при обробленні сталі 30ХГСА значення вибірових середніх \bar{R}_a у цих діапазонах подач змінюються немонотонно і не за параболічною залежністю. При збільшенні подачі до певних значень для зразків із чавуну КЧ 30-6, сталі 30ХГСА і сталі 45 відповідні максимальні значення $\bar{R}_{a1\max}$, $\bar{R}_{a2\max}$, $\bar{R}_{a3\max}$ їх вибірових середніх зменшуються, досягаючи мінімальних значень $\bar{R}_{a1\min}$, $\bar{R}_{a2\min}$, $\bar{R}_{a3\min}$, а при подальшому збільшенні подачі вони зростають (див. рис. 2а). Для дослідних зразків із сталі 45 і чавуну КЧ30-6 мінімальні значення $R_{a1\min}$, $\bar{R}_{a2\min}$ досягаються відповідно при подачах 0,1 мм/об і 0,075 мм/об. Для дослідного зразка із сталі 30ХГСА мінімальне значення $\bar{R}_{a3\min}$ досягається при подачі 0,075 мм/об.

Формування шорсткості на дослідних зразках із кольорових сплавів при збільшенні подачі від 0,05 мм/об до 0,25 мм/об характеризується монотонною функцією, значення якої зростає при збільшенні подачі. Зауважимо, що при обробленні цих сплавів спостерігалась стружка надлому, що свідчить про відсутність пластичної складової при формуванні шорсткості. Зміна \bar{R}_a в залежності від подачі s істотна практично в усьому діапазоні значень подач і для всіх матеріалів дослідних зразків. Для дюралюмінію Д16Т зміна дисперсій на всьому діапазоні подач (за винятком подачі $s_i = 0,175$ мм/об) неістотна. Для інших кольорових сплавів не встановлено певних закономірностей істотності зміни дисперсій.

2.4 Ймовірісно-статистичний метод оцінювання впливу форми та розмірів на шорсткість поверхні сформованої токарною обробкою

Суть запропонованого ймовірісно-статистичного методу оцінювання впливу форми та розмірів поперечного перерізу циліндричної поверхні сформованої точінням на її шорсткість полягає у наступному. Здійснюють експериментальні дослідження, використовуючи токарний верстат та спеціальні дослідні зразки, які виконані у вигляді товстостінних концентричних кілець (рис. 2.20).

У таблиці 1 подані присвоєні номери відповідним циліндричним поверхням дослідних зразків, їх діаметри, а також конструктивні параметри і елементи режимів (напівчистового і чистового) оброблення дослідних зразків. Особливістю конструкції цих зразків є те, що окремі циліндричні поверхні як внутрішні так і зовнішні виконані з однаковими діаметрами.

Таким чином підбираючи різним діаметрам оброблюваної поверхні, як зовнішнім так і внутрішнім, відповідні режими токарної обробки, ми забезпечуємо однакову швидкість різання – $V=100$ м/хв. та інші елементи режиму різання. Це дозволить виключити вплив цих параметрів на результати досліджень.

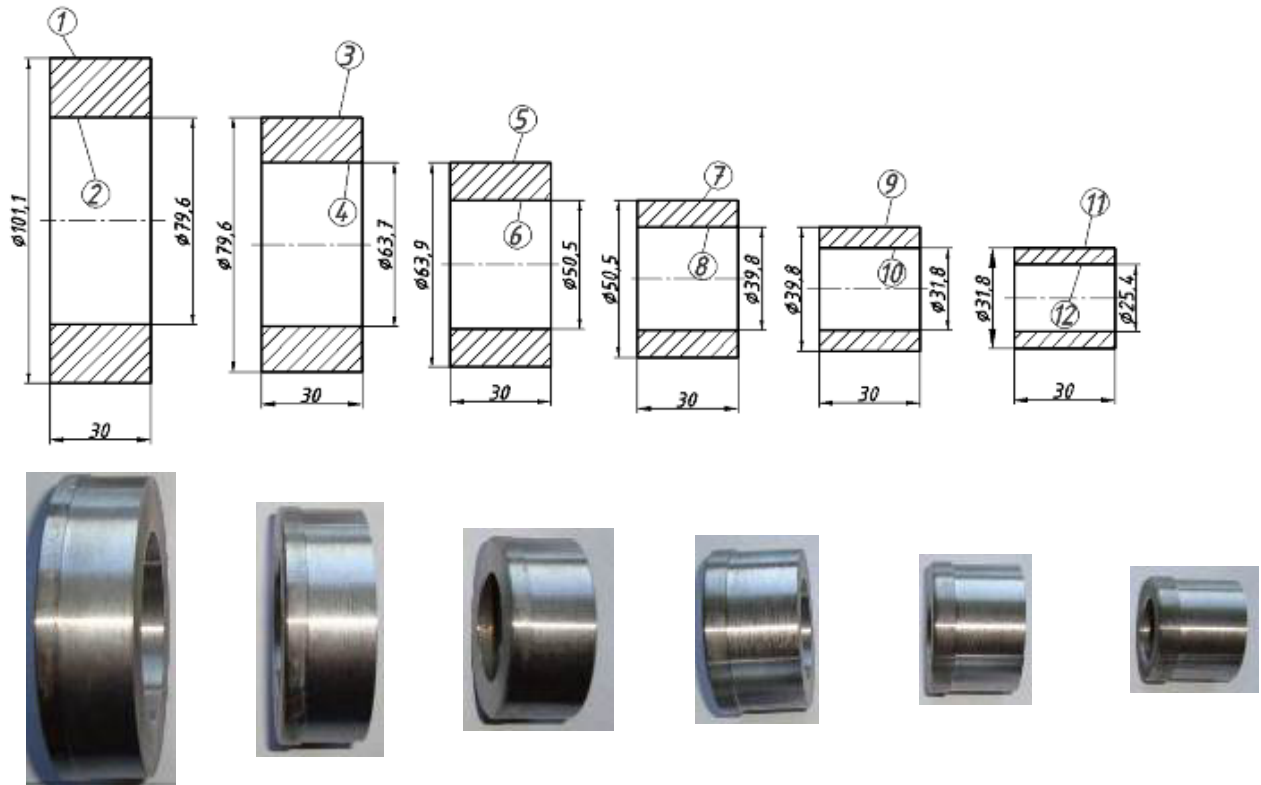


Рисунок 2.20 – Схематичне зображення комплекту дослідних зразків

Окрім цього діаметри досліджуваних циліндричних поверхонь цих зразків підбрані з врахуванням частот обертання шпинделя токарного верстату так, що при виконанні фінішного технологічного переходу оброблення цих поверхонь практично забезпечується з однаковою швидкістю різання.

Дослідження здійснювались в два етапи.

Перший етап реалізовувався у науково-дослідній лабораторії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Україна), а другий у Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Laboratory for Mechanical Systems Engineering, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf, (Switzerland).

Таблиця 2.15 – Значення порядкових номерів та діаметрів (D - зовнішніх, d - внутрішніх) циліндричних поверхонь дослідних зразків та частот обертання n для поверхонь експериментальних зразків

Порядкові номери циліндричних поверхонь досліджуваних зразків	зовнішніх $j=1, 3..10$	1	3	5	7	9	11
	внутрішніх $i=2, 4..12$	2	4	6	8	10	12
Діаметри номери циліндричних поверхонь досліджуваних зразків після фінішної обробки	зовнішніх D_j , мм	101, 1	79,6	63,7	50,5	39,8	31,8
	внутрішніх d_j , мм	79,6	63,7	50,5	39,8	31,8	25,4
Частота обертання шпинделя при фінішній обробці	зовнішні поверхні, n_i , об/хв	315	400	500	630	800	100 0
	внутрішні поверхня, n_j , об/хв	400	500	630	800	100 0	125 0
Елементи режиму обробки напівчистова/чистова	глибина різання, t , мм	1/0,5					
	S , подача	0,21/0,12					
	V , швидкість	$100^{+7}/100^{+2}$					

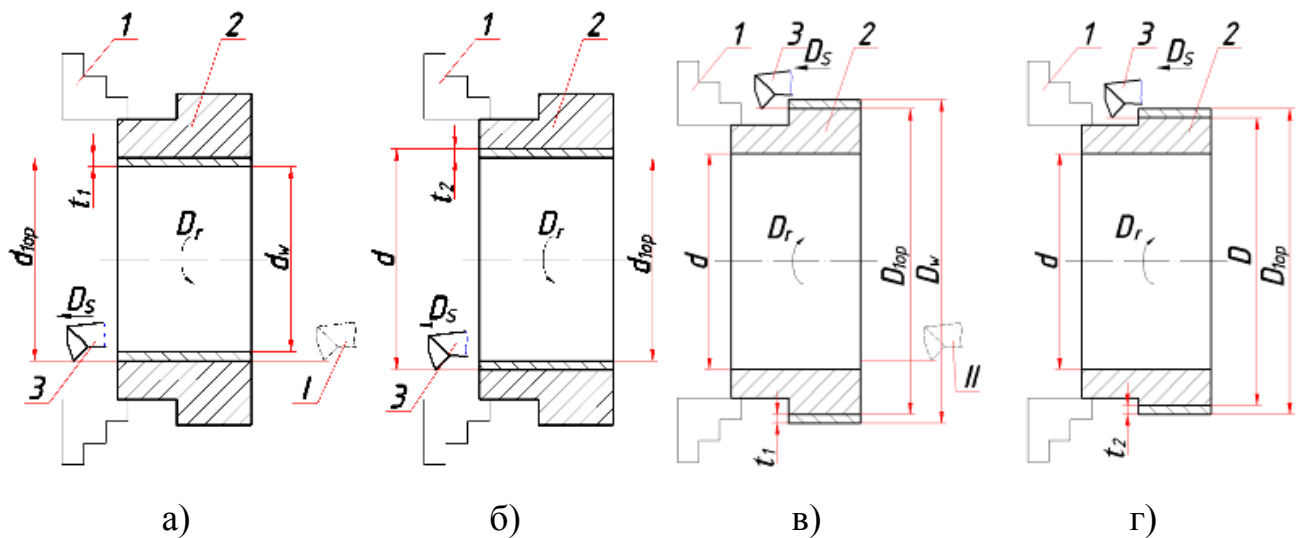
Технологія формування поверхонь наступна. На першому технологічному напівчистовому переході дослідний зразок як заготовку встановлювали у трьохкулачковий патрон токарно-гвинторізного верстату моделі 16K20 так, щоб забезпечувались мінімальні значення радіального і торцевого биття і закріплювали (рис. 2.21).

Для забезпечення процесу різання використовували спеціальний прохідно-розточний різець. Матеріал ріжучої частини різця вольфрамо-титано

кобальтовий сплав Т15К6. Геометричні параметри різця наступні: головний кут в плані $\varphi=45^\circ$; допоміжний кут в плані – $\varphi'=15^\circ$; головний передній кут $\gamma=0^\circ$; кут нахилу головної різальної кромки $\lambda=0^\circ$.

Формування кожної із досліджуваних внутрішньої і зовнішньої циліндричних поверхонь здійснювали за два переходи. На першому переході (рис. 2.21 а) виконувалась напівчистова обробка для забезпечення мінімального радіального биття.

При цьому режими обробки були наступними: глибина різання – $t_1=1\text{мм}$; подача $S=0,21\text{мм/об}$; швидкість різання визначалась за формулами відповідно на внутрішні і зовнішні циліндричні поверхні.



а) і б) – відповідно напівчистовий і чистовий переходи формування внутрішньої циліндричної поверхні; в) і г) – відповідно напівчистовий і чистовий переходи формування зовнішньої циліндричної поверхні

Рисунок 2.21 – Технологічні переходи токарної операції формування внутрішньої і зовнішньої циліндричних поверхонь окремого дослідного зразка з відповідними розмірами їх поперечних перерізів

Прохідно-розточний різець встановлювали у початкове вихідне положення I (показано пунктиром), яке б забезпечувало глибину різання $t_1=1\text{мм}$. Включали головний обертовий рух Dn і рух повздовжньої подачі Ds забезпечивши $S=0,21\text{мм/об}$. та формували внутрішню циліндричну поверхню.

Після цього різець переміщали у початкове вихідне положення I і забезпечували глибину різання $t_2=0,5\text{мм}$, подачу $S=0,12\text{мм/об}$, кількість обертів заготовки $n=315\text{хв.}^{-1}$ і $v=100\text{м/хв.}$ і формували на чистовому переході внутрішню циліндричну поверхню із значенням параметра $k_i=1/r$ (рис. 2.21 б).

Після закінчення чистового переходу різець переміщали перпендикулярно до повздовжньої осі дослідного зразка і встановлювали у початкове положення II. Після цього різець разом із супортом верстату переміщали перпендикулярно повздовжній осі дослідного зразка на величину більшу половини діаметра зовнішньої циліндричної поверхні цього зразка. Включали реверсивний рух Dr і аналогічно двом попереднім переходам здійснювали обточування зовнішньої циліндричної поверхні цього зразка. При цьому забезпечували розміри поперечного перерізу цієї поверхні дослідного зразка з використанням параметра k_j . (рис. 2.21, в, г).

Такі технологічні переходи здійснювали на інших циліндричних поверхнях дослідних зразків і отримували при цьому фінішні внутрішні і зовнішні циліндричні поверхні певних діаметрів (таблиця 2.15). Поперечні перерізи цих діаметрів мали значення параметрів k , які відображені в таблицях 2.16 і 2.17.

На кожній досліджуваній циліндричній поверхні, використовуючи профілометр моделі 296, на рівномірно розміщених по колу 10 трасах визначали значення параметра шорсткості R_a і формували у статистичні ряди [168].

Значення параметрів шорсткості R_a , характеристик розсіювання: математичного моделювання $M(\bar{R}_a)$ і дисперсії $D(R_a)$ та значень критеріїв Стюдента t_{kG} і W для внутрішніх і зовнішніх циліндричних поверхонь подані в таблиці 2.16 і 2.17. Для підтвердження закономірностей впливу розмірів і форми поперечних перерізів внутрішніх і зовнішніх циліндричних поверхонь на параметр шорсткості R_a здійснили додаткові дослідження на другому етапі.

Таблиця 2.16 – Значення номінальних діаметрів d_i , параметра k_i їх поперечних перерізів, характеристик розсіювання: $M(\bar{R}_{a_i})$ і $D(R_{a_i})$ для внутрішніх циліндричних поверхонь та значень критеріїв t_k і W

Розрахункові параметри оброблюваних циліндричних поверхонь: діаметр d , мм / параметр k_i , мм ⁻¹					
79,6/0,025	63,7/0,031	50,5/0,039	39,8/0,050	31,8/0,063	25,4/0,078
Статистичні ряди параметра R_{a_i} , мкм для внутрішніх циліндричних поверхонь					
1,12	1,53	1,47	1,25	1,75	1,75
1,11	1,44	1,48	1,76	1,63	1,76
0,95	1,56	1,38	2,05	1,66	1,95
1,06	1,53	1,55	1,86	1,87	1,70
1,12	1,55	1,39	1,64	1,95	1,77
1,17	1,52	1,59	2,04	1,91	1,75
0,99	1,56	1,52	2,03	1,79	1,73
1,13	1,25	1,32	1,20	1,47	1,75
1,07	1,30	1,54	1,05	1,92	1,92
1,03	1,34	1,25	1,57	1,65	1,87
Математичні сподівання $M(\bar{R}_{a_i})$ для внутрішніх циліндричних поверхонь					
1,055	1,363	1,406	1,504	1,715	1,844
Дисперсії $D(R_{a_i})$, мкм ² статистичних рядів \bar{R}_{a_i} внутрішніх циліндричних поверхонь					
0,0025	0,0068	0,0130	0,0710	0,0180	0,0045
Значення критерію Греббса – t_{kG} для відповідних статистичних рядів параметра R_{a_i} циліндричних поверхонь при допустимому значенні $t_{kG}=2,44$:					
2,31	2,39	1,63	2,04	1,857	2,15
Значення критерію W для статистичних рядів параметра R_a внутрішніх циліндричних поверхонь при допустимому значенні $W_{кр}=0,842$					
0,947	0,812	0,945	0,901	0,934	0,827

Таблиця 2.17 – Значення номінальних діаметрів D_j , параметра k_j їх

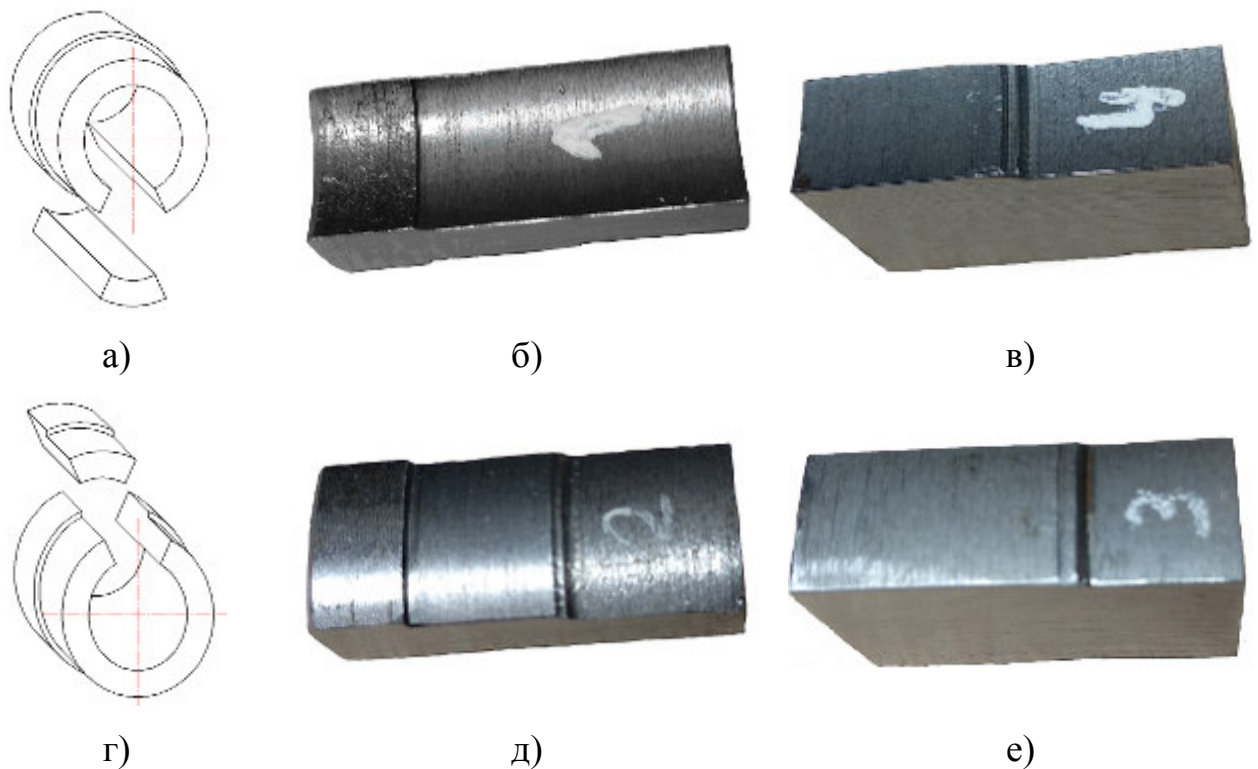
поперечних перерізів, характеристик розсіювання: $M(\bar{R}_{a_j})$ і $D(R_{a_j})$ для зовнішніх циліндричних поверхонь та значень критеріїв t_{kG} і W

Розрахункові параметри оброблюваних циліндричних поверхонь: діаметр D , мм / параметра k_j , мм ⁻¹					
101,1/0,02	79,6/0,025	63,7/0,031	50,5/0,039	39,8/0,050	31,8/0,063
Статистичні ряди параметра R_{a_j} , мкм для зовнішніх циліндричних поверхонь					
0,6	0,86	1,06	1,11	1,53	1,47
0,59	0,83	1,02	1,12	1,42	1,51
0,61	0,85	0,96	1,11	1,26	1,24
0,46	0,84	0,95	1,01	1,34	1,25
0,60	0,77	1,00	1,14	1,26	1,05
0,61	0,84	1,00	1,11	1,25	1,22
0,56	0,86	0,91	1,10	1,27	1,35
0,48	0,8	1,04	1,01	1,13	1,14
0,55	0,72	0,86	0,96	0,87	1,36
0,49	0,75	0,94	1,05	1,22	1,27
Математичні сподівання $M(\bar{R}_{a_j})$ для зовнішніх циліндричних поверхонь					
0,519	0,772	0,946	1,040	1,169	1,280
Дисперсії $D(R_{a_j})$, мкм ² статистичних рядів \bar{R}_{a_j} зовнішніх циліндричних поверхонь					
0,0015	0,0014	0,0026	0,0019	0,0210	0,0093
Значення критерію Греббса – t_{kG} для відповідних статистичних рядів параметра R_{a_j} циліндричних поверхонь при допустимому значенні $t_{kG}=2,44$:					
2,33	2,34	2,22	2,41	2,25	2,37
Значення критерію W для статистичних рядів параметра R_{a_j} зовнішніх циліндричних поверхонь при допустимому значенні $W_{kp}=0,842$					
0,843	0,871	0,971	0,868	0,916	0,972

При цьому використовувався скануючий інтерференційний мікроскоп білого кольору Zygo NewView 6200 (США). Цей мікроскоп надає можливість

здійснювати тривимірний аналіз мікрорельєфу відбиваючої поверхні, створює графічне зображення і здійснює цифровий аналіз, що забезпечує одержання високоточних даних про структуру поверхні досліджуваного зразка.

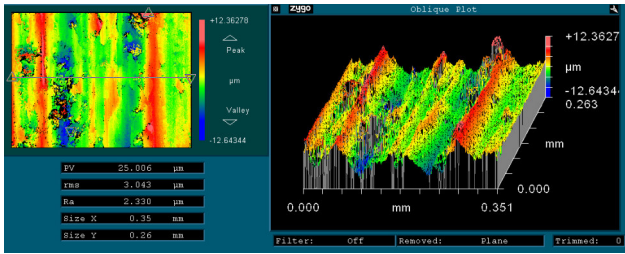
Для здійснення досліджень шорсткості циліндричних поверхонь сформованих при однакових режимах різання, але з різними діаметрами поперечних перерізів циліндричних поверхонь із раніше отриманих дослідних зразків вирізали сегменти, які зображені на рисунку 2.22.



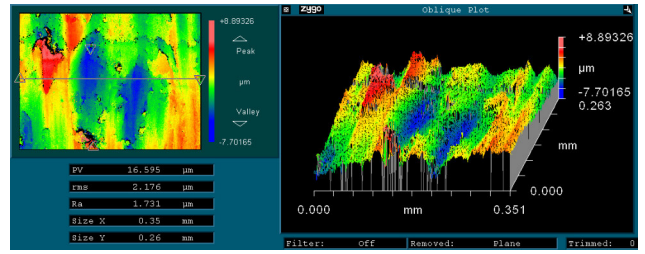
а), г) – схеми формування; б), в) – внутрішні циліндричні поверхні з параметрами відповідно $k = 0,031$ і $k = 0,078 \text{ мм}^{-1}$; д), е) – зовнішні циліндричні поверхні з параметрами відповідно $k = 0,020$ і $k = 0,063 \text{ мм}^{-1}$.

Рисунок 2.22 – Елементи дослідних зразків для 3-D профілометрії:

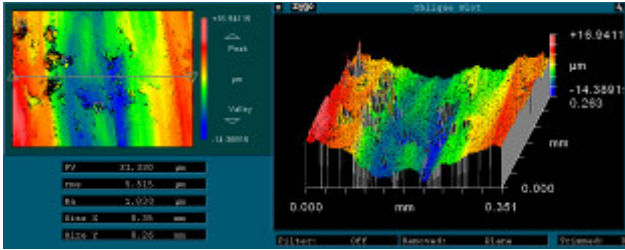
В результаті здійснення 3-D профілометрії отримали на встановленій одиничній площі $x \times y = 0,35 \times 0,26 \text{ мкм}$ фотографії мікрорельєфів, окремі зразки яких подані на рис. 2.23.



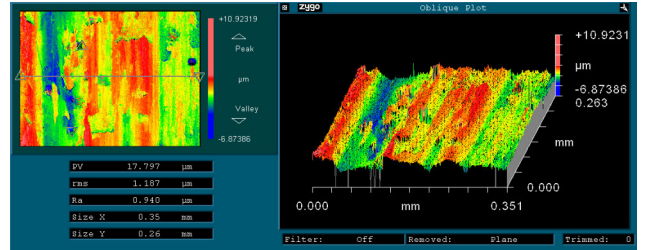
$$R_a = 2,33 \text{ мкм}; d=23,4 \text{ мм}; k=0,078 \text{ мм}^{-1}$$



$$R_a = 1,73 \text{ мкм}; d=63,7 \text{ мм}; k=0,031 \text{ мм}^{-1}$$



$$R_a = 1,83 \text{ мкм}; D=31,8 \text{ мм}; k=0,063 \text{ мм}^{-1}$$



$$R_a = 0,94 \text{ мкм}; D=101,0 \text{ мм}; k=0,02 \text{ мм}^{-1}$$

Рисунок 2.23 – 3D профілометрія поверхонь дослідних зразків із сталі 45, отриманих при наступних режимах обробки: глибина різання $t=0,5$ мм; подача $s=0,12$ мм/об; швидкість різання $V=100$ м/хв

Використавши дані про параметр R_a отримані на мікроскопі Zygo NewView 6200 з поверхонь елементів дослідних зразків, що подані у таблиці 4, за методом ітерацій [20] визначали характеристики розсіювання, а саме: математичне сподівання $M(\bar{R}_a)$ і дисперсію $D(R_a)$.

За критерієм Греббса t_{kG} перевіряли однорідність значень статистичних рядів. У випадку виявлення значень R_a яке різко виділялось його відкидали і додатково здійснювали вимірювання параметра R_a на додатковій трасі. Отримане значення параметра R_a включали у статистичний ряд і повторно визначали t_k .

Забезпечивши однорідність значень R_a у статистичних рядах при різних діаметрах внутрішніх і зовнішніх циліндричних поверхонь і параметри k їх поперечних перерізів та використавши метод ітерацій на основі малої вибірки [20] остаточно визначали значення характеристик розсіювання: $M(\bar{R}_a)$ і $D(R_a)$.

Таблиця 2.18 – Значення параметра шорсткості R_a і його характеристик розсіювання $M(\bar{R}_a)$ і $D(R_a)$

Номер зразка	Діаметр поверхні	Параметр поверхні k	Значення параметрів шорсткості R_a в межах досліджуваної площі зразка							$M(\bar{R}_a)$	$D(R_a)$
1	$d=23,4$	0,078	2,33	2,279	2,84	2,541	2,531	2,331	2,471	0,018	
2	$D=31,8$	0,063	1,831	1,622	2,040	1,813	1,755	1,879	1,836	0,0085	
3	$D=101,1$	0,02	1,033	1,339	0,94	1,869	1,669	1,835	1,594	0,06	
4	$d=63,7$	0,031	1,731	2,397	1,853	2,808	2,139	2,597	2,379	0,082	

Окрім цього, використавши критерій W [260] підтвердили гіпотезу про нормальний закон розподілу величини R_a . Необхідно відзначити, що критерій W є більш потужніший ніж критерій Пірсона χ^2 , коли має місце обмежена кількість членів вибірки (таблиці 2.17, 2.18).

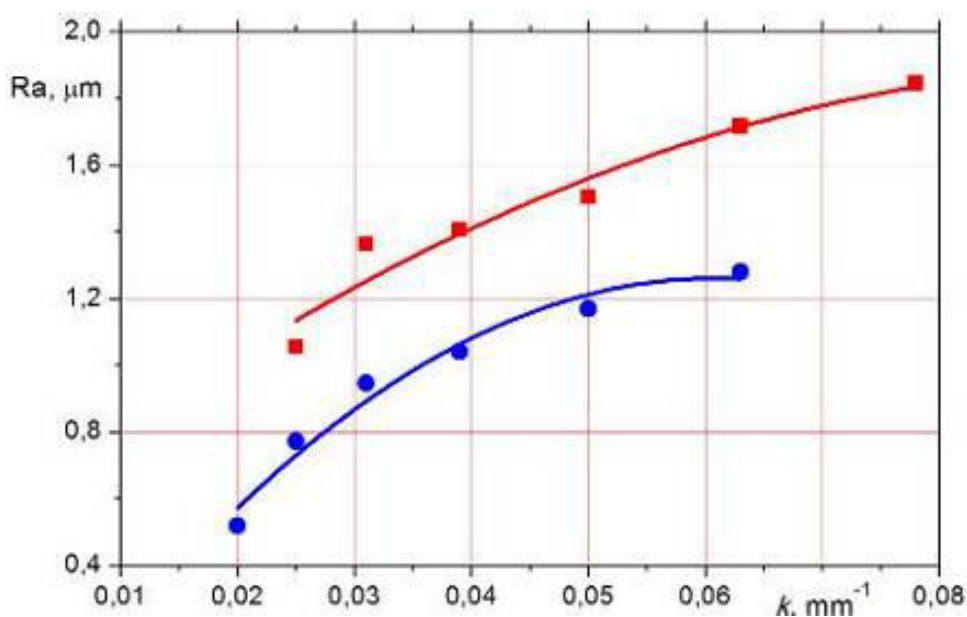
За критерієм Стюдента t_k [157] визначали наявність суттєвої відмінності, між параметром шорсткості на внутрішній і зовнішній циліндричних поверхнях при однакових діаметрах, що проілюстровано графіком на рис. 2.24.

Значення випадкових величин R_{a_i} та R_{a_j} отримані в процесі експериментальних досліджень на першому і другому етапах за критерієм W підпорядковані нормальному закону розподілу Гаусса, а математичні сподівання цих характеристик $M(R_{a_i})$ і $M(R_{a_j})$ рекомендовано вважати ґрунтовними оцінками. Аналіз результатів досліджень параметрів шорсткості R_{a_i} та R_{a_j} виконаних при однакових значеннях параметра k поперечних перерізів внутрішніх і зовнішніх циліндричних поверхонь за критерієм Стюдента показав суттєву відмінність між значеннями $M(R_{a_i})$ і $M(R_{a_j})$ отриманими на внутрішніх і зовнішніх поверхнях.

Таблиця 2.19 – Значення критеріїв Стюдента для характеристик розсіювання випадкових величин за середнім значенням \bar{R}_{a_i} зовнішніх і

внутрішніх циліндричних поверхонь з однаковим параметром k

Розрахункові параметри оброблюваних циліндричних поверхонь: параметр k мм ⁻¹				
0,025	0,031	0,039	0,050	0,063
Значення критерію Стюдента t_k при $k=18$				
14,332	13,60	9,48	3,49	8,32
Значення ймовірності $P(t_k)$ за критерієм Стюдента t_k при допустимій ймовірності $P_q(t_k) = 0,05$				
Відмінність середніх значень: істотна “+”; неістотна “-”				
$P(t_k) = 0$ “+”	$P(t_k) = 0$ “+”	$P(t_k) = 0$ “+”	$P(t_k) = 0,003$ “+”	$P(t_k) = 0$ “+”



● – для зовнішніх циліндричних поверхонь; ■ – для внутрішніх циліндричних поверхонь

Рисунок 2.24 – Залежність середнього значення шорсткості R_a циліндричних поверхонь від параметра k :

Це явище може бути пояснено зменшенням кута нахилу площини зсуву і збільшенням величини пластичної деформації зрізаного шару обробленої поверхні.

На першому етапі досліджень середнє відхилення профілю R_a визначалося як випадкова величина і за ґрунтовну оцінку приймали його математичне сподівання, а окремі реалізації профілю подавались як плоска задача. Аналіз результатів досліджень виконаних на першому етапі досліджень

показав, що значення характеристик параметра шорсткості R_a отриманих при однакових діаметрах поперечних перерізів суттєво відрізняються від значень характеристик параметра шорсткості R_a отриманих на другому етапі досліджень у тривимірному просторі. Разом з тим закономірність впливу збільшення діаметра поперечних перерізів досліджуваних циліндричних поверхонь на зростання величини R_a як за даними експериментів першого і другого етапів зберігається.

Це пояснюється тим, що наконечник алмазної голки щупа профілометра має певне заокруглення з відповідним радіусом. Це не дозволяє контактувати вершині голки із дном западин профілю і тому отримані математичні сподівання є меншими ніж у випадку використання скануючого мікроскопа.

2.5 Спосіб аналітичного опису профілю поверхні

Вдосконалення методів моделювання мікрогеометрії поверхні є одним з кроків до забезпечення відтворюваності профілю поверхні, створення методів опису його діагностичного стану. Для оцінювання мікрогеометрії застосовують як параметричні (критерії шорсткості) так і непараметричні критерії оцінювання. Зокрема відомі праці у яких було використано густини та функції густин розподілу ординат та тангенсів кутів нахилу профілю, а також його мікротопографії. Ефективність застосування непараметричного підходу для вирішення оптимізаційних задач доведена численними дослідженнями. Зокрема, раніше була описана математична модель циклічної структури мікрорельєфу поверхні наноструктурованого титанового сплаву Ti6Al4V. Самоорганізацію поверхні, після лазерного ударно-силового впливу розглянуто, як циклічний випадковий процес, що забезпечило опис геометричних особливостей мікрорельєфу. Компоненти запропонованої моделі враховують сегменти-цикли циклічного мікрорельєфу. Дана програма створена на основі нового методу моделювання, що враховує нову математичну модель і

дозволяє закласти в процедуру моделювання параметри амплітуди на кожному сегменті-циклі у структурі мікрорельєфу поверхні металу.

Реалізація способу відбувалась наступним чином. Досліджуваний зразок із титанового сплаву Ti6Al4V, профіль шорсткості поверхні якого потрібно описати, встановлюють на стіл скануючого інтерференційного мікроскопа білого кольору Zygo NewView 6200, за допомогою якого будують профілограму поверхні досліджуваного зразка. Визначають параметри профілограми та за допомогою математичної моделі, аналітично описують профіль поверхні. Причому ця математична модель враховує його сегментну циклічну структуру і представлена у вигляді,

$$\xi_{\omega}(l) = \sum_{i=1}^c f_i(l), l \in W, \quad (2.30)$$

де l – величина, яка приймає дискретні значення, для даного прикладу $l_k = \overline{0,256}$, $k = \overline{1,1024}$;

c – кількість сегментів-циклів циклічного профілю шорсткості становить $c=13$;

i – порядковий номер сегмент-циклу, який по чергово набуває значення від 1 до c .

До сегмент-циклів циклічного мікрорельєфу, які визначаються через індикаторні функції введено додаткові компоненти $\alpha_{w_i}(l)$, які відображають масштабні коефіцієнти амплітуди профілю шорсткості на кожному сегменті-циклі циклічного процесу

$$f_i(l) = \xi_{\omega}(l) \cdot \alpha_{w_i}(l) \cdot I_{w_i}(l), i = \overline{1, C}, l \in W, \quad (2.31)$$

де $I_{w_i}(l)$ – індикаторні функції, які виділяють сегменти-цикли;

$\alpha_{w_i}(l)$ – додаткові компоненти які відображають масштабні коефіцієнти амплітуди профілю шорсткості на кожному сегменті-циклі циклічного процесу.

Причому індикаторні функції, які виділяють сегменти-цикли, визначаються наступним чином

$$I_{W_i}(l) = \begin{cases} 1, l \in W_i, \\ 0, l \notin W_i. \end{cases} \quad (2.32)$$

де W_i – область визначення індикаторної функції, яка у випадку дискретного сигналу, тобто W , дорівнює дискретній множині відліків

$$W_i = \{l_{i,j}, j = \overline{1, J}\} \quad (2.33)$$

де j – дискретний відлік, який приймає значення від 1 до J (кількість дискретних відліків на сегменті-циклі), який для заданого прикладу рівний $J=77$.

Сегментна циклічна структура враховується множиною просторових відліків $\{l_i\}$ або $\{l_{i,j}\}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, J}$, причому у такій конструкції математичної моделі враховано ритм профілю шорсткості через неперервну функцію ритму $T(l, n)$, а саме

$$I_{W_i}(l) = I_{W_{i+n}}(l + T(l, n)), \quad n \in Z. \quad (2.34)$$

Додаткові компоненти, які відображають масштабні коефіцієнти амплітуди профілю шорсткості на кожному сегменті-циклі циклічного процесу

$$\alpha_{W_i}(l) = \begin{cases} \alpha_i, l \in W_i, \\ 0, l \notin W_i. \end{cases} \quad (2.35)$$

де α_i масштабні коефіцієнти амплітуди профілю шорсткості на кожному i -му сегменті-циклі, які визначаються наступним чином:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{i \max}}{\alpha_{aver}}, \quad (2.36)$$

де $\alpha_{i \max}$ - максимальне значення амплітуди профілю шорсткості на i -му сегменті-циклі;

α_{aver} - середнє значення амплітуди профілю шорсткості (максимальне значення амплітуди математичного сподівання, визначене на етапі статистичної обробки циклічної структури мікрорельєфу).

Для порівняння запропонованої моделі із аналогом проведено комп'ютерне моделювання реалізацій мікрорельєфу та проведено оцінювання

відносних похибок $\delta(k)$ за прототипом, які наведені в таблиці 2.20 та запропонованою моделлю – в таблиці 2.21. Графічно результати моделювання проілюстровані графічним матеріалом.

Таким чином запропонований спосіб аналітичного опису профілю поверхні є більш точнішим.

Таблиця 2.20 – Дані отримані за результатами розрахунку за прототипом

k , мкм	0	25	50	75	100	125	150	165
$f_1(l)$, мкм	3,16	6,23	5,26	6,01	5,23	3,85	3,21	3,08
$\delta(k)$, мкм	0,31	0,2	1,13	0,08	0,01	0,17	0,08	0,16

Таблиця 2.21 – Дані отримані за результатами розрахунку за запропонованою моделлю

k , мкм	0	25	50	75	100	125	150	165
$f_2(l)$, мкм	3,96	6,24	7,41	6,20	6,20	4,72	3,94	3,27
$\delta(k)$, мкм	0,11	0,2	0,59	0,03	0,02	0,38	0,26	0,23

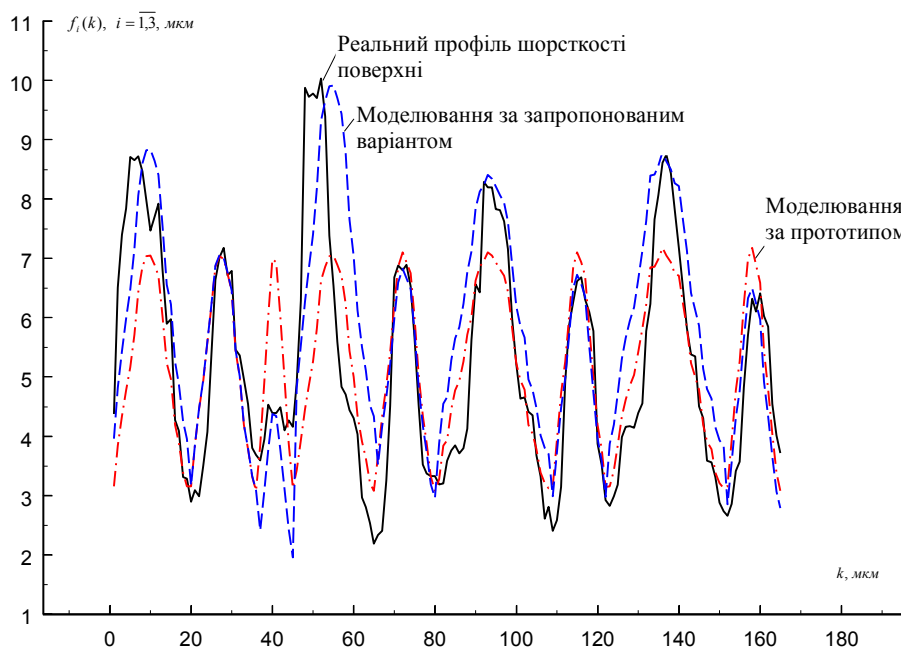


Рисунок 2.25 – Порівняння результатів моделювання існуючих моделей для аналітичного опису профілю поверхні із запропонованою

Розроблена програма „Моделювання реалізації мікрорельєфу” [247] спрямована на вирішення таких задач:

1. Визначення амплітудних характеристик на кожному сегменті-циклі у структурі мікрорельєфу поверхні металу.
2. Визначення статистичних оцінок (математично сподівання та дисперсії) сегментів-циклів мікрорельєфу.
3. Проведення моделювання на основі врахування статистичної інформації оцінок ймовірнісних характеристик та амплітудних характеристик на кожному сегменті-циклі.

Відображення у вигляді графіка отриманих результатів моделювання.

Опис структури програми „Моделювання реалізації мікрорельєфу”.

Структурно-функціональна схема програми „Моделювання реалізації мікрорельєфу” приведена на рисунку 2.26.

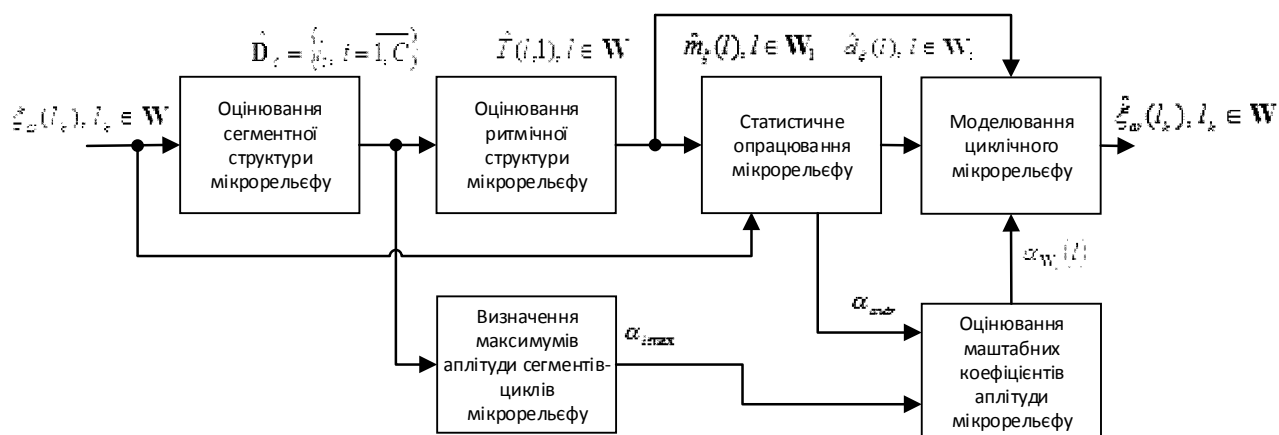


Рисунок 2.26 – Структурно-функціональна схема програми „Моделювання реалізації мікрорельєфу”

Комп’ютерна програма „Моделювання реалізації мікрорельєфу” складається з таких основних складових:

1. Блок «Вхідні дані».
2. Блок «Відображення результатів».
3. Блок «Статистична обробка».
4. Блок «Моделювання».

У блоці «Вхідні дані» здійснюється завантаження досліджуваної профілограми у вигляді файлу «*.txt» також тут завантажується функція ритму профілограми.

У блоці «Відображення результатів» візуалізуються отримані результати у вигляді графіків.

У блоці «Статистичної обробки» проводиться визначення статистичних оцінок математичного сподівання, дисперсії та автокореляційної функції.

У блоці «Моделювання» здійснюється процес моделювання реалізацій мікрорельєфу.

Програма працює наступним чином.

Спочатку вхідні дані (у форматі *.txt) завантажуються у програму. Для контролю вводу правильних даних в комп'ютерній програмі передбачена можливість візуалізації введених даних. Як приклад на рисунку 2 поданий загальний вигляд інтерфейсу програми для візуалізації даних рис.2.27.

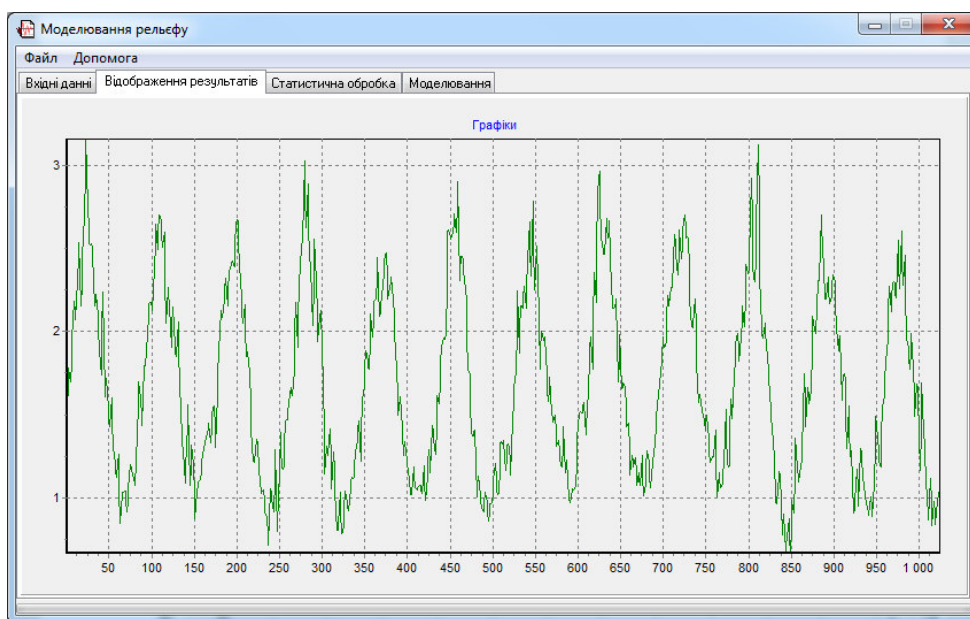


Рисунок 2.27 – Загальний вигляд інтерфейсу програми для візуалізації вхідних даних

Після введення необхідних даних необхідно провести їх статистичне опрацювання та отримати статистичні оцінки математичного сподівання та дисперсії.

Приклад інтерфейсу програми де завантажена оцінка математичного сподівання досліджуваної профілограми наведено на рисунку 2.28. На рисунку 2.29 наведений приклад визначення масштабних циклів згідно запропонованого методу. На рисунку 2.30 поданий приклад інтерфейсу для проведення моделювання реалізації мікрорельєфу. Приклад відображення отриманих результатів моделювання наведено на рисунку 2.31 (червоним кольором).

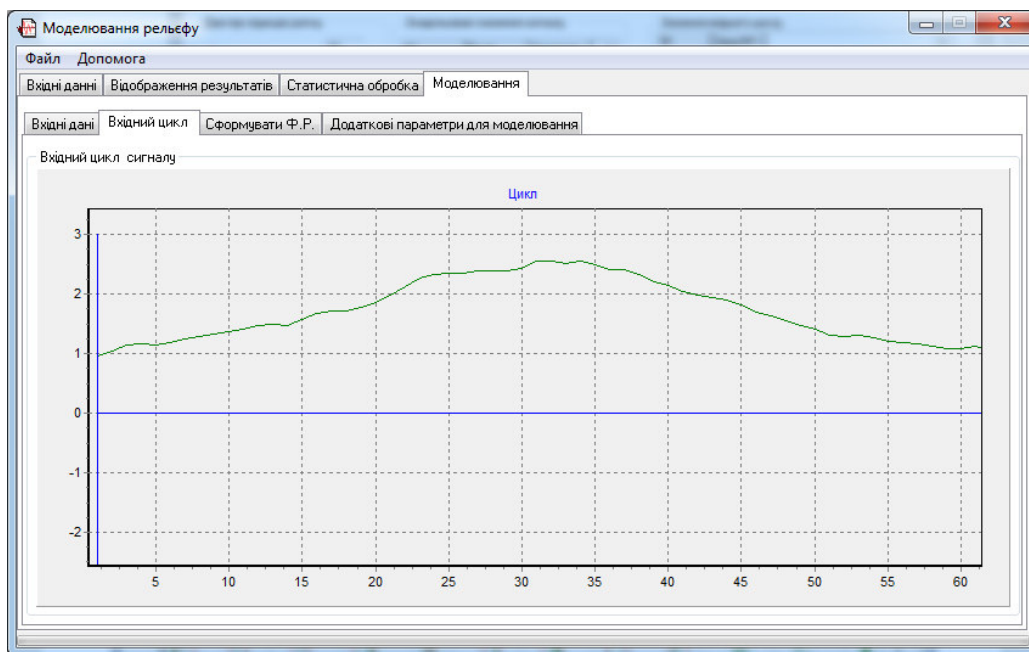


Рисунок 2.28 – Інтерфейс програми для відображення оцінки математичного сподівання досліджуваного мікрорельєфу.

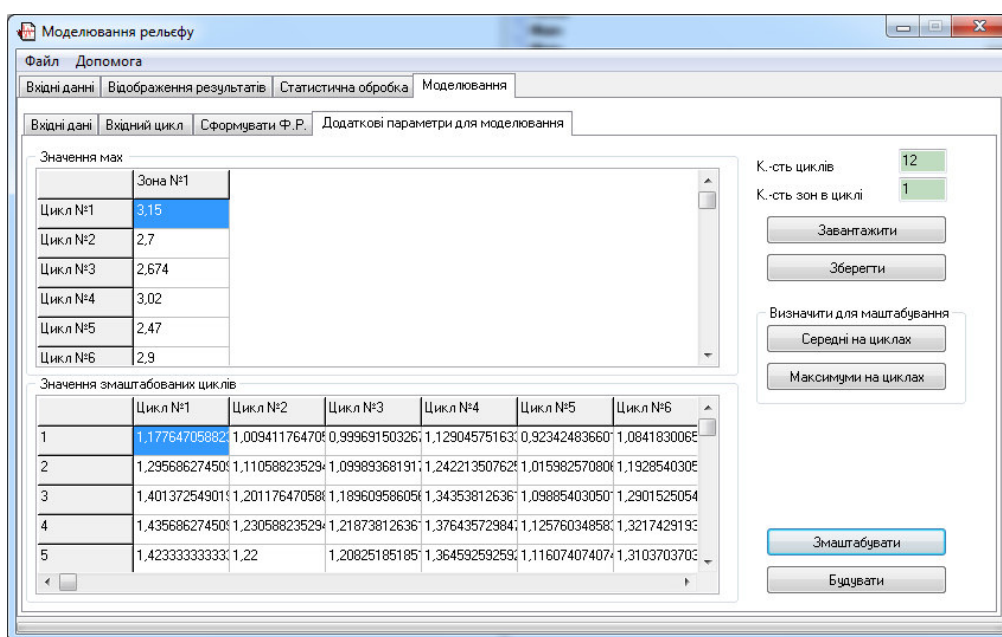


Рисунок 2.29 – Інтерфейс програми для відображення масштабних коефіцієнтів досліджуваного мікрорельєфу.

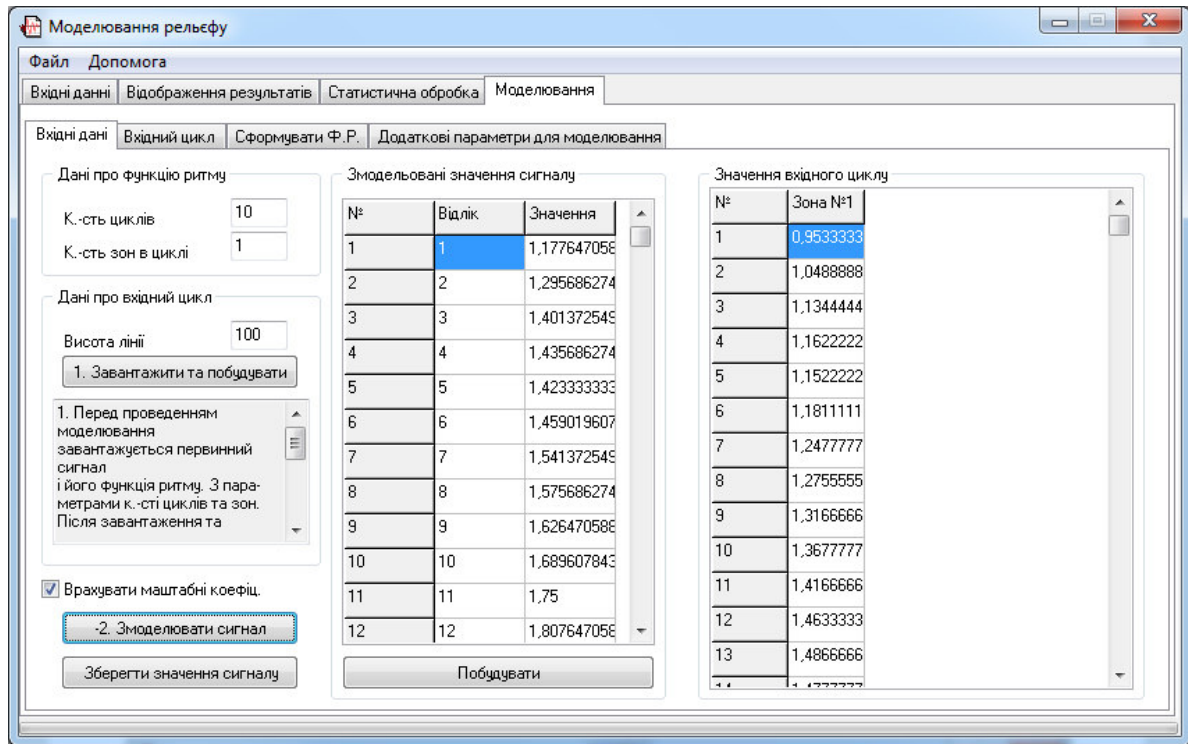


Рисунок 2.30 – Інтерфейс програми для відображення даних для моделювання реалізації мікрорельєфу.

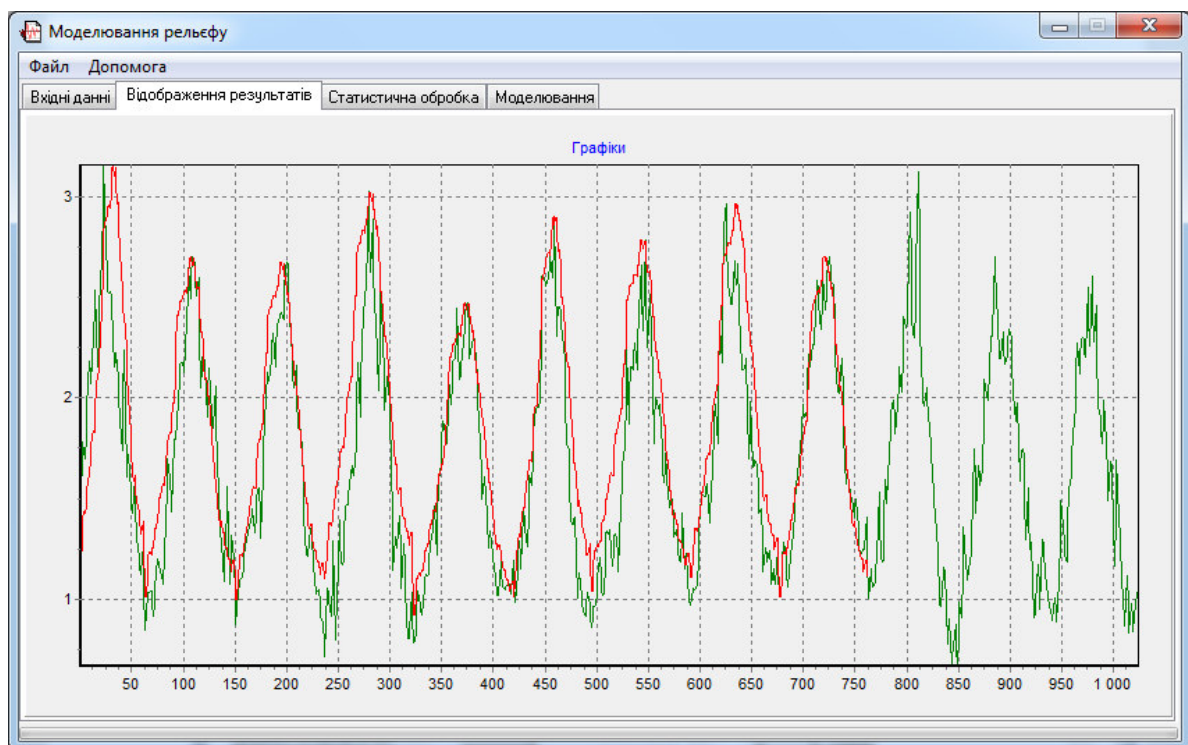


Рисунок 2.31 – Інтерфейс програми для відображення результатів моделювання реалізації мікрорельєфу.

2.6 Висновки до другого розділу

1. На основі теорії малих вибірок з врахуванням закону розподілу Релея відхилень від круглості розроблений метод визначення оцінки технологічної спадковості та отримані залежності для оцінки точності форми поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь. Це при використанні відповідних критеріїв надає можливість виявити неефективність технологічних операцій. Аналіз отриманих в результаті апроксимації відхилень від круглості тригонометричним рядом Фур'є, гармонік дає можливість визначити напрями удосконалення технологічного процесу з метою підвищення точності форми поперечних перерізів гідроциліндрів. З використанням запропонованого методу та даних експериментальних досліджень відхилень від круглості виявлено неефективну технологічну операцію напівчистове розточування при обробці внутрішніх циліндричних поверхонь гідроциліндрів. Для усунення негативних наслідків необхідно удосконалити інструментально-технологічне забезпечення, що використовується на цій операції.

2. Встановлено, що числове значення параметра шорсткості R_a середнього квадратичного відхилення шорсткості не може бути однозначною оцінкою якості поверхні, оскільки його зменшення не завжди буде наслідком покращення експлуатаційних параметрів поверхні. Оцінку якості поверхні на фінішних операціях слід здійснювати за допомогою й інших параметрів, зокрема кривої Аббота-Фаєрстоуна. Режими технологічних операцій, які забезпечують геометричні розміри повинні забезпечувати: висотний параметр шорсткості поверхні в межах R_a 6,3-8 мкм та кроковий $S=0.4-0.6$ мм та однорідну структуру поверхні.

3. Запропонований метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні сформованої точінням, вперше надає можливість у ймовірнісному аспекті за відповідними критеріями оцінити істотність впливу подачі на параметри шорсткості оброблюваної поверхні. При обробленні пластичних матеріалів точінням на малих подачах $0,02 \leq s \leq 0,075$ мм/об залежність R_a від S

незмінна, а при подачах $s > 0,075$ мм/об – монотонно зростаюча. Зокрема для сталі 30ХГСА зменшення подачі від 0,05 до 0,02 мм/об призводить до несуттєвого зменшення шорсткості відповідно до формули $R_z \approx s^2 / 8r$.

4. Вперше встановлені закономірності впливу форми та розмірів поперечних перерізів і форми циліндричних поверхонь (зовнішні і внутрішні) на параметр шорсткості – середнє відхилення профілю R_a . Зменшення діаметра поперечних перерізів внутрішніх і зовнішніх циліндричних поверхонь призводить до збільшення математичних сподівань параметра R_a . Так при зростанні параметра $k=1/r$ поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь з $k_i = 0,025$ мм⁻¹ до $k_i = 0,078$ мм⁻¹ математичне сподівання зросло від $M(\bar{R}_a) = 1,055$ мкм до $M(\bar{R}_a) = 1,844$ мкм. При зростанні параметра k поперечних перерізів зовнішніх циліндричних поверхонь з $k_i = 0,020$ мм⁻¹ до $k_i = 0,063$ мм⁻¹ математичне сподівання зросло від $M(\bar{R}_a) = 1,519$ мкм до $M(\bar{R}_a) = 1,280$ мкм. Форма поперечних перерізів внутрішніх і зовнішніх циліндричних поверхонь при одному і тому ж діаметрі має суттєвий вплив на математичне сподівання параметра R_a . Так усереднене математичне сподівання R_a внутрішніх циліндричних поверхонь у 1,357 разів більше від аналогічного параметра зовнішніх циліндричних поверхонь. Значення математичних сподівань параметра R_a отримані на скануючому інтерференційному мікроскопі Zygo NewView 6200 на дослідних зразках з відповідними діаметрами у середньому більші у 1,542 рази для внутрішніх і у 2,14 разів для зовнішніх циліндричних поверхонь.

РОЗДІЛ 3

ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ НА ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХНЯХ

3.1 Особливості процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях

Для забезпечення регулярності мікрорельєфу розроблено динамічну модель його формування з урахуванням таких параметрів як фізико-механічні властивості обробленої поверхні, величину зовнішньої дії на поверхню з боку інструменту (віброобкатника), характер контакту та багато іншого.

В даній роботі ми розглядаємо формування РМР на внутрішній циліндричній поверхні заготовки. Даний процес супроводжується такими рухами: обертовим рухом D_n , рухом подачі D_s та зворотно-поступальним осциляційним рухом D_i (рис. 3.1).

Процес формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні має свої особливості, зокрема:

- циліндрична оброблювальна поверхня обертається навколо нерухокої осі;
- зовнішня дія на оброблювальну поверхню зі сторони тіла, яке наносить мікрорельєф носить точковий характер, до того ж точка контакту вказаних тіл змінюється у поздовжньому та радіальному напрямках.

Складові вказаних переміщень та кутова швидкість обертання циліндричної поверхні впливають на динамічні процеси у пружному циліндричному тілі, які супроводжують процес нанесення мікрорельєфу та визначають форму мікрорельєфу. Щодо складової мікрорельєфу, яка зумовлена динамічними процесами циліндричного тіла, то вона в першу чергу зумовлена поздовжніми та крутильним його коливаннями, а отже визначається пружними властивостями тіла, крайовими умовами та зовнішньою дією.

Із наведеного вище випливає, що під дією зовнішніх силових факторів пружне циліндричне тіло, на яке наноситься мікрорельєф перебуває у складному русі [15]. Тому для описання його динаміки у роботі розглядаються такі його складові:

- переносний - обертальний навколо горизонтальної осі як абсолютно твердого тіла;

- відносний:

а) крутильні коливання навколо горизонтальної осі пружного тіла;

б) поздовжні коливання пружного тіла.

Саме вказані питання є предметом дослідження розділу.

3.1.1 Дослідження впливу зовнішніх чинників на переносний обертальний рух оброблювального тіла.

Основні припущення, які лежать в основі описання переносного руху тіла (рис. 3.1) наступні:

- пустотіле циліндричної форми тіло на внутрішню поверхню якого наноситься мікрорельєф – однорідне, зовнішній його (тіла) радіус R_d , внутрішній - r_d , довжина - l_d , маса - M_d ;

- активні та пасивні сили, які діють на оброблювальне тіло:

а) точкова дія тіла, яке наносить мікрорельєф на внутрішню циліндричну його поверхню. Складові цієї дії F_x , F_z . (вісь OX горизонтальна і співпадає із віссю обертання, вісь OZ - вертикальна, вісь OY - горизонтальна);

б) привідний момент M_{gh} , який спонукає тіло обертатись навколо горизонтальної осі, зрізувальний момент (M_{ph}) дії віброобкатника на внутрішню поверхню і він залежить від таких чинників - притискуючого зусилля, форми віброобкатника, твердості матеріалу оброблювальної поверхні та ін. Нижче приймається, що останні чинники враховуються коефіцієнтом f_{ph}

$$(M_{ph} = F_z \cdot r_d \cdot f_{ph}).$$

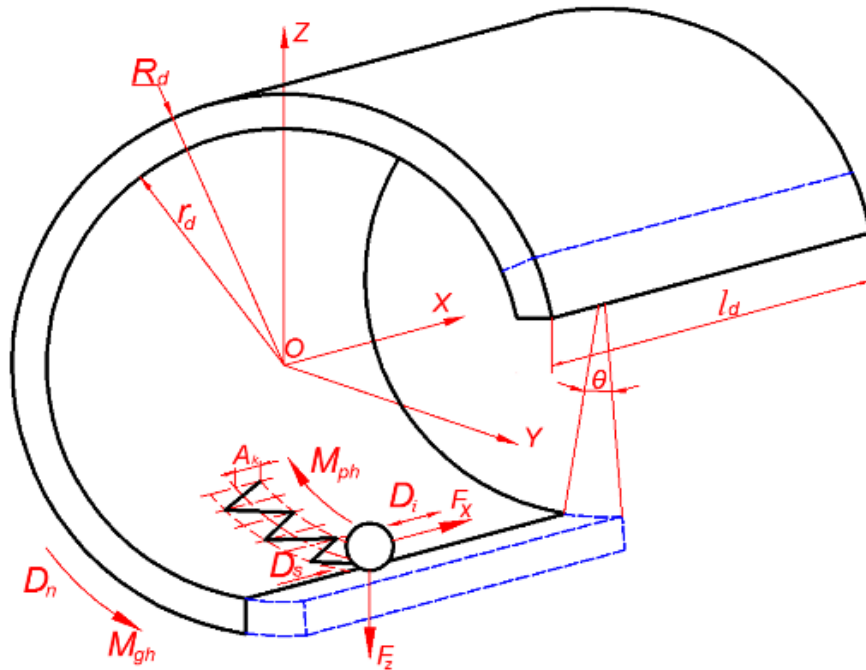


Рисунок 3.1. Схема формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні деталі

Якщо позначити кут повороту оброблюваного тіла $\theta(t)$, то із диференціального рівняння обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі [15, 16], маємо

$$I_{ox} \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{gh} - M_{ph} \quad (3.1)$$

I_{ox} - момент інерції оброблювального тіла відносно осі обертання OX , тобто

$I_{ox} = M_d \frac{R_d^2 + r_d^2}{2}$, M_d - маса тіла, R_d , r_d - зовнішній та внутрішній радіуси циліндричного тіла.

Щодо привідного моменту, то він буде рівним

$$M_{gh} = f(t) + F_z \cdot r_d \cdot f_{ph} \quad (3.2)$$

де $f(t)$ - складова привідного моменту, яка примушує заготовку здійснювати відносний коливальний рух (знакозмінна функція).

У сукупності наведене дозволяє диференціальне рівняння (3.1) представити у вигляді

$$I_{ox} \frac{d^2\theta}{dt^2} = f(t) . \quad (3.3)$$

Шляхом інтегрування залежності (3) отримуємо

$$\theta = A + Bt + \frac{1}{I_{ox}} \int_0^t \int_0^\tau f(\tau) d\tau dt , \quad (3.4)$$

де A, B - сталі інтегрування, які знаходяться із початкових умов.

Зокрема, якщо функція, котра визначає поперечну складову моменту рівна $f(t) = A_k \cdot \sin(pt)$ (A_k - амплітуда привідного моменту, p - частота), то кутова швидкість обертання тіла ω рівна

$$\omega = \xi_0 - \frac{A_k}{pI_{ox}} (\cos pt - 1) \quad (3.5)$$

і відповідно кут його повороту

$$\theta(t) = \omega_0 t - \frac{A_k}{p^2 I_{ox}} (\sin pt - pt) , \quad (3.6)$$

ω_0 - початкова кутова швидкість оброблюваного тіла.

Таким чином, закон переносного руху оброблювального тіла описується для синусоїдального закону привідного моменту залежністю (3.6).

3.2. Динаміка відносного руху оброблювального циліндричного тіла в процесі нанесення мікрорельєфу

У цьому підрозділі досліджуються відносні коливання оброблювального пружного тіла в процесі нанесення на його поверхню мікрорельєфу. Розглядаються поздовжні та крутильні їх складові. Особливістю їх є та обставина, що вони відбуваються під дією дискретного зовнішнього навантаження, то того ж із часом воно змінює свою точку прикладання. Все це створює певні труднощі при побудові розв'язків крайових задач, які описують вказані коливання.

3.2.1. Динаміка відносного поздовжнього руху оброблювального тіла.

Відомо [17, 18], математичною моделлю поздовжніх коливань однорідного пружного тіла за умови, що пружні його властивості задовольняють нелінійному технічному закону пружності [19], а сила в'язкого тертя пропорційна швидкості ϵ , за певних крайових умов, диференціальне рівняння

$$u_{tt}(x,t) - \beta^2 u_{xx}(x,t) = \epsilon \left[\eta u_t(x,t) + \hat{\beta} (u_x(x,t))^2 u_{xx}(x,t) \right] + \xi(x,t) \quad (3.7)$$

в якому $u(x,t)$ поздовжнє переміщення перерізу тіла з координатою x в довільний момент часу t ; $\beta^2 = E\bar{A}/m_d$, $\bar{A} = \pi(R_d^2 - r_d^2)$ - площа поперечного перерізу деталі; $m_d = M_d/l_d$ - маса одиниці довжини тіла (погонна маса); $m_d \xi(x,t)$ - розподіл вздовж тіла зовнішнього навантаження); η - коефіцієнт пропорційності у силі в'язкого тертя; $\hat{\beta}$ коефіцієнт, який характеризує відхилення пружних властивостей тіла від лінійного закону; ϵ - малий параметр, що вказує на малу величину останніх двох сил у порівнянні із другим

доданком лівої частини рівняння (7). Для процесу нанесення мікрорельєфу на оброблювальне тіло маємо дещо складніший випадок:

- по-перше, зовнішня дія носить точковий характер;
- по-друге, точка прикладання вказаної дії неперервно переміщається вздовж твірної внутрішньої поверхні оброблювального тіла і вказану особливість треба враховувати функцією $\xi(x,t)$ (рис. 3.2).

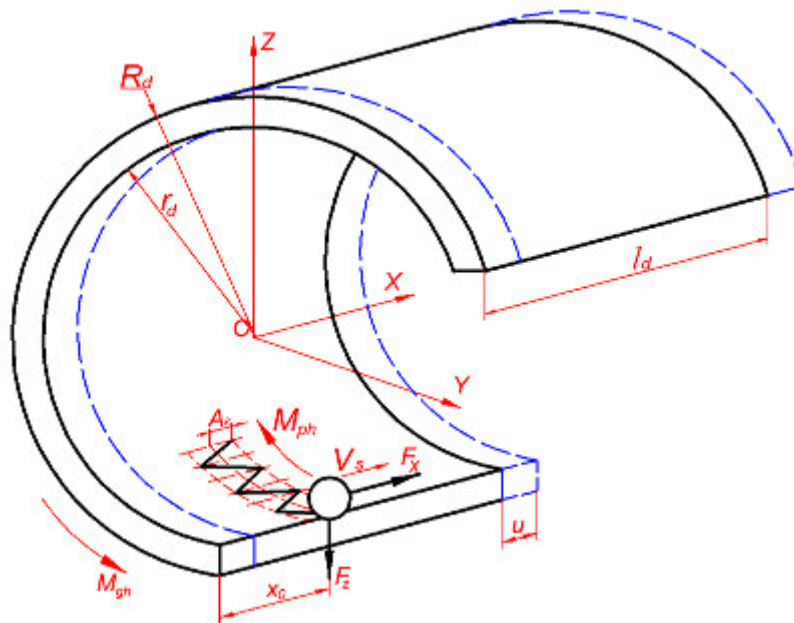


Рисунок 3.2. Розрахункова схема для побудови динамічної моделі відносного поздовжнього руху оброблювального тіла в процесі формування регулярного мікрорельєфу

Наведене вище дозволяє стверджувати, що зовнішня дія на оброблювальне тіло залежить як від часу, так і від лінійної змінної. У літературі [12-25] для описання точкової дії зовнішнього навантаження на пружні тіла існує два підходи. Перший із них полягає у представленні вказаної дії у вигляді значення функції у заданій точці (наприклад, $\xi(x,t)|_{x=x_0}$, x_0 - точка прикладання сили), другий - за допомогою дельта функції (наприклад $\xi(x,t)\delta(x-x_0)$, $\delta(x-x_0)$ - дельта функція).

Для процесу нанесення мікрорельєфу на внутрішню поверхню оброблювального тіла, як було наголошено вище, маємо дещо складніший

випадок – точка прикладання зовнішньої дії змінюється в часі, і своє положення, причому відносно положення її змінюється неперервно. Вказані особливості динаміки процесу нанесення мікрорельєфу оброблювальне тіло запропоновано представити за допомогою дельта-функції у вигляді $F_x \bar{f}_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - V_s t)$, а V_s - поздовжня складова швидкості руху віброобкатника вздовж твірної циліндричної поверхні тіла (швидкість подачі), \bar{x}_0 - початкове значення абсциси нанесення мікрорельєфу. Враховуючи наведене, диференціальне рівняння відносних поздовжніх коливань набуває вигляду

$$u_{tt} - \beta^2 u_{xx} = \varepsilon \left[\eta u_t + \hat{\beta} (u_x)^2 u_{xx} \right] + F_x \bar{f}_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - V_s t), \quad (3.8)$$

де $x_0 + V_s \cdot t$ - координата контакту віброобкатника з поверхнею формування РМР (рухома точка), \bar{f}_{ph} - аналог коефіцієнту f_{ph} для поздовжнього руху.

Щодо крайових умови для рівняння (8), то вони приймають вигляд

$$u(x, t)|_{x=0} = 0, u(x, t)|_{x=l} = 0, \quad (3.9)$$

які еквівалентні умові відсутності горизонтальних переміщень кінців оброблювального тіла.

Приймається, що величини F_x та F_z дії на оброблювальне тіло є сталими по величині. Таким чином, дослідження динаміки відносного поздовжнього руху циліндричного тіла на внутрішню поверхню котрого наноситься мікрорельєф звелось до побудови, а від так дослідження розв'язку крайової задачі (3.8), (3.9) із дискретною правою частиною. Останнє не є обмеженням для застосування загальних ідей методів збурень при побудові розв'язку вказаної крайової задачі. Таким чином, загальний розв'язок нелінійного рівняння (3.8) за однорідних крайових умов (3.9) будемо шукати у вигляді [17, 23]

$$u(x, t) = u_0(x, t) + \tilde{u}_0(x, t) + \varepsilon U(x, t), \quad (3.10)$$

де $u_0(x, t)$ - розв'язок однорідної крайової задачі, тобто

$$u_{0tt}(x, t) - \beta^2 u_{0xx}(x, t) = 0, \quad (3.11)$$

$$u_0(x, t)|_{x=0} = 0, u_0(x, t)|_{x=l} = 0, \quad (3.12)$$

а $\tilde{u}_0(x, t)$ - частинний розв'язок неоднорідного рівняння $\tilde{u}_{0t} - \beta^2 \tilde{u}_{0xx} = F_X \bar{f}_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - V_s t)$; $U(x, t)$ - функція, яка враховує вплив на процес сили вязкопружного тертя та нелінійної складової відновлювальної сили і, очевидно вона має задовольняти однорідні крайові умови, які випливають із (3.9) – (3.12). На її знаходження зупинимось дещо нижче.

Розв'язок однорідної крайової задачі можна представити [17] у вигляді

$$u_0(x, t) = \sum_k X_k(x) S_k(t), \quad (3.13)$$

де система власних функцій $X_k(x)$ має вигляд $\{X_k(x)\} = \left\{ \sin \frac{k\pi}{l} x \right\}$, а

$S_k(t) = S_{0k} \sin(\omega_k t + \phi_{0k})$, S_{0k} , ϕ_{0k} - сталі, які знаходяться із початкових умов

неоднорідного рівняння, $\omega_k = \frac{k\pi}{l_d} \beta = \frac{k\pi}{l_d} \sqrt{\frac{EA}{m_d}}$.

Система власних функцій $\{X_k(x)\}$ має властивість повноти та ортонормованості, а тому частинний розв'язок рівняння (8), тобто функцію $\tilde{u}(x, t)$ треба також шукати у вигляді

$$\tilde{u}(x, t) = \sum X_k(x) \tilde{S}_k(t) \quad (3.14)$$

в такому разі крайові умови (3.9) будуть справджуватись для загального розв'язку крайової задачі (3.8), (3.9). Функції ж $\tilde{S}_k(t)$ у поданні (3.14) повинна бути розв'язком неоднорідного рівняння

$$\ddot{\tilde{S}}_k(t) + \beta^2 \left(\frac{k}{l_d} \right)^2 \tilde{S}_k(t) = \frac{1}{l_d} \int_0^l X_k(x) F_X \bar{f}_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - V_s t) dx \quad (3.15)$$

Властивості дельта функції [17, 25] дозволяють інтеграл у правій частині рівняння (3.15) представити у вигляді

$$\int_0^l X_k(x) F_X \bar{f}_{ph} \delta(x - x_0 - V_s t) dx = F_X \bar{f}_{ph} \sin \frac{k\pi}{l_d} (\bar{x}_0 + V_s t), \text{ а отже для знаходження}$$

частинного розв'язку рівняння (3.15) маємо залежність

$$\ddot{\tilde{S}}_k(t) + \beta^2 \left(\frac{k}{l_d} \right)^2 \tilde{S}_k(t) = \frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} F_X \sin \frac{k(\bar{x}_0 + V_s t)}{l_d} \quad (3.16)$$

Отже, представлення зовнішньої дії на оброблювальне тіло за допомогою дельта-функції із використання методу частинної дискретизації дозволило проблему знаходження функції $\tilde{u}(x, t)$ вирішити, адже частинний розв'язок рівняння (3.16) має вигляд

$$\tilde{S}_k(t) = \frac{1}{k\beta} \bar{f}_{ph} F_X \int_0^t \sin \frac{k(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{k}{l_d} \beta(t - \tau) \right) d\tau. \quad (3.17)$$

Щодо функції $U(x, t)$, то із базового рівняння та отриманих вище результатів шляхом зрівнювання коефіцієнтів правої і лівої частин при малому параметрі ε маємо співвідношення

$$U_{tt}(x, t) - \beta^2 U_{xx}(x, t) = \eta [u_{0t}(x, t) + \tilde{u}_{0t}(x, t)] + \left[\hat{\beta} (u_{0x}(x, t) + \tilde{u}_{0x}(x, t))^2 (u_{0xx}(x, t) + \tilde{u}_{0xx}(x, t)) \right] \quad (3.18)$$

Його частинний одночастотний розв'язок, який задовольняє однорідні крайові умови знаходиться аналогічно до викладеного вище і нижче наведемо тільки прикінцеві результати. $U(x,t) = \sum_k \sin \frac{k\pi}{l} x H_k(t)$, де функція $H_k(t)$ є розв'язком звичайного лінійного неоднорідного диференціального рівняння

$$\begin{aligned} \frac{d^2 H_k(t)}{dt^2} + \left(\beta \frac{k\pi}{l_d}\right)^2 H_k(t) = \eta \left\{ S_{0k} \omega_k \cos(\omega_k t + \varphi_{0k}) + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} F_X \int_0^t \sin \frac{k(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{k}{l_d} \beta (t - \tau) \right) d\tau \right] \right\} + \\ + \left(\frac{k\pi}{l_d} \right)^4 \hat{\beta} \int_0^l \cos^2 \frac{k\pi}{l_d} x \sin^2 \frac{k\pi}{l_d} x dx \left\{ S_{0k} \sin(\omega_k t + \varphi_{0k}) + \frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} F_X \int_0^t \sin \frac{k(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{k}{l_d} \beta (t - \tau) \right) d\tau \right\}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

тобто

$$\begin{aligned} H_k(t) = \frac{l_d}{k\pi\beta} \int_0^t \cos \left(\beta \frac{k\pi}{l_d} (t - \tau) \right) \Theta(\tau) d\tau, \\ \Theta(t) = \eta \left\{ S_{0k} \omega_k \cos(\omega_k t + \varphi_{0k}) + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} F_X \int_0^t \sin \frac{k(x_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{k}{l_d} \beta (t - \tau) \right) d\tau \right] \right\} + \\ + \left(\frac{k\pi}{l_d} \right)^4 \hat{\beta} \frac{\pi}{8} \left\{ S_{0k} \sin(\omega_k t + \varphi_{0k}) + \frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} F_X \int_0^t \sin \frac{k(x_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{k}{l_d} \beta (t - \tau) \right) d\tau \right\} \end{aligned}$$

У сукупності отримані результати дозволяють відносні поздовжні коливання циліндричного тіла на внутрішню поверхню якого наноситься мікрорельєф представити у вигляді

$$\begin{aligned} u(x,t) = \sum_k \sin \frac{k\pi}{l_d} x \left\{ S_{0k} \sin(\omega_k t + \varphi_{0k}) + \frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} F_X \left(\frac{k}{l_d} \beta \right)^{-1} \int_0^t \sin \frac{k(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{k}{l_d} \beta (t - \tau) \right) d\tau + \right. \\ \left. + \frac{l}{k\pi\beta} \int_0^t \cos \left(\beta \frac{k\pi}{l_d} (t - \tau) \right) \Theta(\tau) d\tau \right\} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Зауважимо, що принцип одночастотності коливань у системах із багатьма ступенями вільності та розподіленими параметрами дозволяє для практичної реалізації використати лише одну із форм “динамічної рівноваги” пружного оброблювального тіла. Для першої – динамічний процес розглядуваного тіла, набуває вигляду

$$u(x,t) = \sin \frac{\pi}{l_d} x \times \left\{ S_{01} \sin \left(\frac{\pi}{l_d} \sqrt{\frac{EA}{m}} t + \varphi_{01} \right) + \frac{1}{l_d \beta} \bar{f}_{ph} F_X \int_0^t \sin \frac{(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{1}{l_d} \beta (t - \tau) \right) d\tau + \right. \\ \left. + \varepsilon \frac{l_d}{k\pi\beta} \int_0^t \cos \left(\beta \frac{k\pi}{l_d} (t - \tau) \right) \Theta(\tau) d\tau \right\}. \quad (3.21)$$

Одночасно отриманий результат дозволяє записати відносну поздовжню координату $\Xi(x,t)$ мікрорельєфу, який наноситься на внутрішню поверхню циліндричного тіла у формі близькій до першої форми “динамічної рівноваги” у вигляді

$$\Xi(x,t) = x_0 + V_s t + \sin \frac{\pi}{l_d} x \times \left\{ S_{01} \sin \left(\frac{\pi}{l_d} \sqrt{\frac{EA}{m}} t + \varphi_{01} \right) + \frac{1}{l_d \beta} \bar{f}_{ph} F_X \int_0^t \sin \frac{(x_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{1}{l_d} \beta (t - \tau) \right) d\tau + \right. \\ \left. + \varepsilon \frac{l}{k\pi\beta} \int_0^t \cos \left(\beta \frac{k\pi}{l_d} (t - \tau) \right) \Theta(\tau) d\tau \right\}. \quad (3.22)$$

Нижче, відповідно до вказаної залежності, представлено зміну у часі та у залежності від поздовжньої координати кривої яка наноситься на внутрішню циліндричну поверхню із урахуванням її поздовжніх коливань за таких значень параметрів $\varepsilon\beta = 10^3$, $\varepsilon\eta = 10^2$, $\bar{x}_0 = 0$ (рис. 3.3).

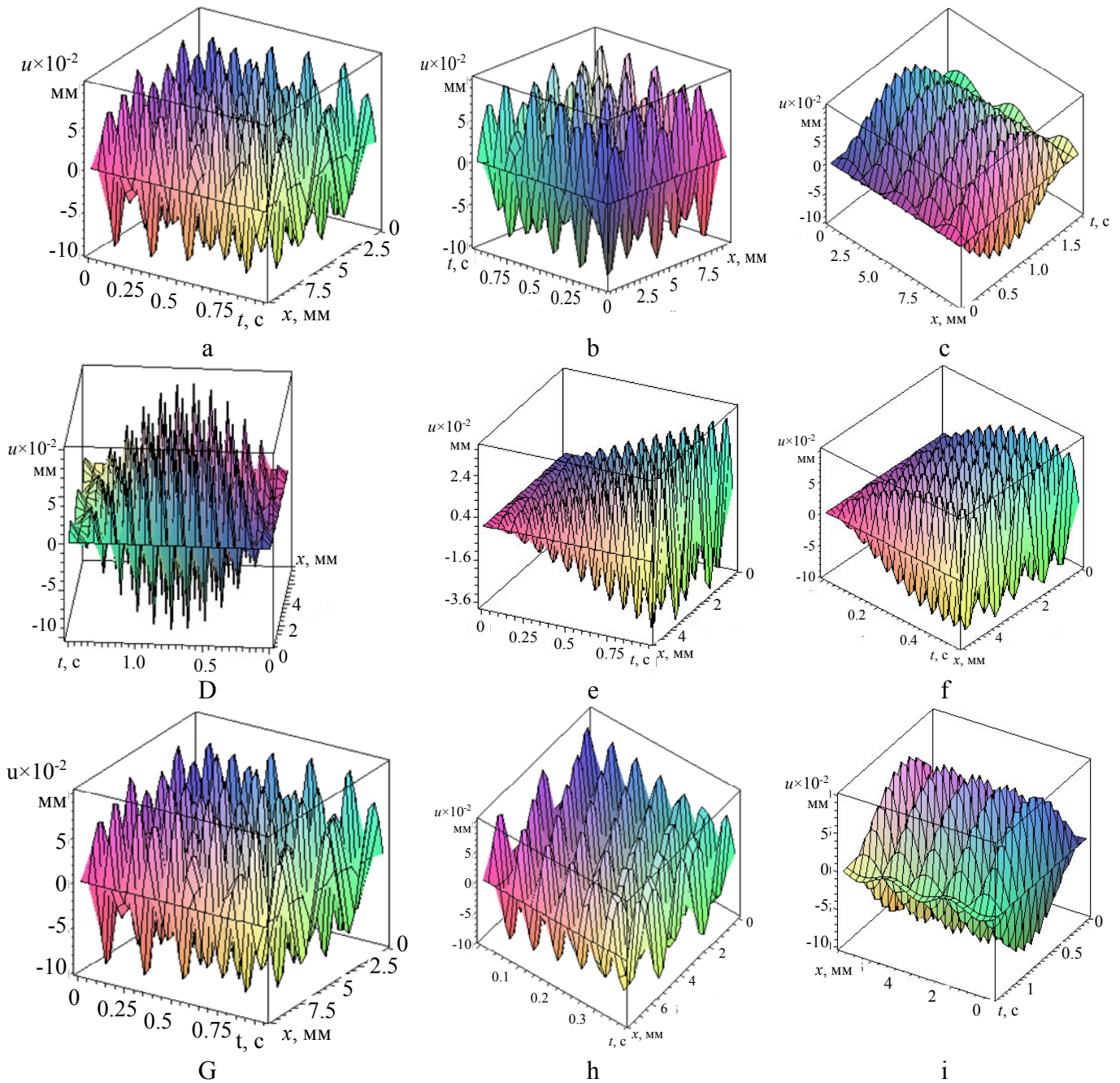


Рисунок 3.3. Зміна мікрорельєфу оброблювальної поверхні зумовлена поздовжніми коливання та рухом віброобкатника при:

- a) $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ H / м}^2$, $l_d = 1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$; $V_s = 0,1 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 1$
- b) $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ H / м}^2$, $l_d = 1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$; $V_s = 0,1 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 0,5$
- c) $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ H / м}^2$, $l_d = 1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$; $V_s = 0,5 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 0,5$
- d) $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ H / м}^2$, $l_d = 0,85 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$; $V_s = 0,5 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 0,5$
- e) $E = 2,4 \cdot 10^{11} \text{ H / м}^2$, $l_d = 0,75 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$; $V_s = 0,75 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 0,5$
- f) $E = 2,4 \cdot 10^{11} \text{ H / м}^2$, $l_d = 0,5 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 400 \text{ Н}$; $V_s = 0,5 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 0,75$

- g) $E = 2,4 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $l_d = 0,5 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 400 \text{ Н}$; $V_s = 0,1 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 0,75$
- h) $E = 2,4 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $l_d = 0,75 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 400 \text{ Н}$; $V_s = 0,2 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 0,75$
- i) $E = 2,4 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $l_d = 0,75 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 400 \text{ Н}$; $V_s = 0,5 \text{ м/с}$; $\bar{f}_{ph} = 0,75$

Представлена залежність показує, що форма твірної мікрорельєфу, яка зумовлена поздовжніми коливаннями залежить не тільки від швидкості пересування віброобкатника, але й від фізико-механічних властивостей тіла, величини зовнішньої дії, а також довжини оброблювальної поверхні.

3.2.2. Динаміка відносних крутильних коливань оброблювального тіла.

Як було наголошено вище, зовнішня дія на внутрішню поверхню циліндричного тіла в процесі нанесення на нього мікрорельєфу призводить до складних його коливань. Якщо відносні поздовжні коливання зумовлені поздовжньою дією віброобкатника на внутрішню циліндричну поверхню, то крутильні – складовою вказаної дії у перпендикулярному до вказаної вище дії, точніше кажучи вздовж дотичної до нормального перерізу у точці контакту віброобкатника до оброблювальної поверхні (рис. 3.4).

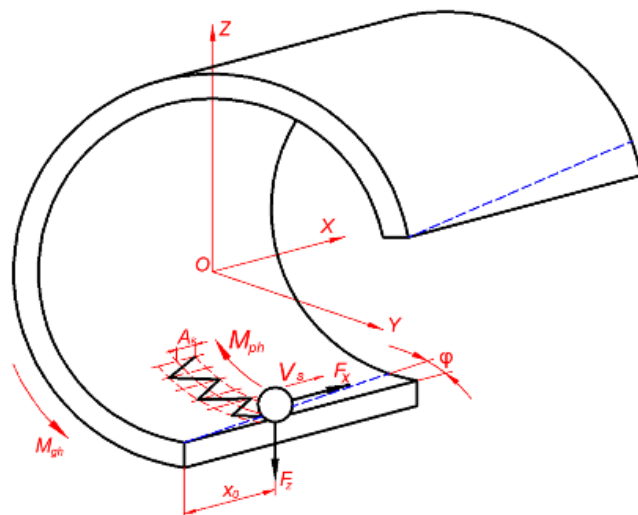


Рисунок 3.4. Розрахункова схема для побудови динамічної моделі відносних крутильних коливань оброблювального тіла в процесі формування регулярного мікрорельєфу

Позначивши $\varphi(x, t)$ - кут закручування нормального перерізу циліндричної поверхні з координатою x в довільний момент часу t , диференціальне рівняння відносних крутильних коливань за прийнятих у попередньому підрозділі припущень щодо пружних та дисипативних сил набуває вигляду

$$\varphi_{tt} - \alpha^2 \varphi_{xx} = \varepsilon \left[\hat{\eta} \varphi_t + \hat{\beta} (\varphi_x)^2 \varphi_{xx} \right] + F_z r f_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - Vt), \quad (3.23)$$

тут $\alpha^2 = \frac{G}{\rho}$, $M_{rh} = \varphi_x G J_p$, J_p - момент інерції перерізу циліндричного тіла, G - модуль пружності другого роду, f_{ph} - коефіцієнт опору зрізування (формування мікрорельєфу), F_z - нормальна складова притискуючого зусилля; $\delta(\dots)$ - дельта функція відповідного аргументу $\hat{\eta}$ $\hat{\beta}$ - коефіцієнти, які характеризують силу опору та нелінійну складову відновлювальної сили.

Примітки.

1. У роботі приймається, що дотична складова у точці контакту віброобкатника до оброблювальної поверхні пропорційна нормальній складові із коефіцієнтом пропорційності f_{ph} .

2. Оброблювальне тіло ізотропне, тому коефіцієнт пропорційності у зрізуючій силі у поздовжньому напрямку такий як і в поперечному.

Щодо крайових умов для рівняння (21) то вони приймають вигляд

$$\varphi(x, t)|_{x=0} = 0, \quad \varphi_x(x, t)|_{x=l} = \frac{M_{rh}}{G J_p}, \quad (3.24)$$

де M_{rh} - привідний момент на початку оброблювального тіла; $M = f(t)$. Для дослідження динаміки крутильних коливань у процесі нанесення мікрорельєфу на циліндричну поверхню необхідно перш за все побудувати розв'язок крайової

задачі (23), (24) – нелінійного диференціального рівняння з частинними похідними за неоднорідних крайових умов. Для його знаходження заміною змінних відповідно до

$$\varphi(x,t) = \Phi(x,t) + \Psi(x,t) \quad (3.25)$$

задачу із неоднорідними крайовими умовами зведемо до задачі із однорідними крайовими умовами [17]. Тому у (23) $\Phi(x,t)$ - є розв'язком рівняння

$$\Phi_{xx}(x,t) = 0 \quad (3.26)$$

що задовольняє неоднорідні крайові умови, які впливають (34), (35), тобто

$$\Phi(x,t)|_{x=0} = 0, \quad \Phi_x(x,t)|_{x=l} = \frac{M}{GJ_p}. \quad (3.27)$$

Тоді $\Psi(x,t)$ функція повинна бути розв'язком рівняння

$$\begin{aligned} \Psi_{tt} - \alpha^2 \Psi_{xx} = & -\Phi_{tt}(x,t) + \alpha^2 \Phi_{xx}(x,t) - F_z r f_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - Vt) + \varepsilon \hat{\eta} (\Phi_t(x,t) + \Psi_t(x,t)) + \\ & + \varepsilon \hat{\beta} [\Phi_{xx}(x,t) + \Psi_{xx}(x,t)] [\Phi_x(x,t) + \Psi_x(x,t)]^2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

та задовольняти однорідні крайові умови

$$\Psi(x,t)|_{x=0} = 0, \quad \Psi_x(x,t)|_{x=l} = 0. \quad (3.29)$$

Знайти розв'язок рівняння (24) за крайових умов (25) не становить значних труднощів

$$\Phi(x,t) = C_1(t)x + C_2(t), \quad (3.30)$$

$$\text{де } C_2(t) = 0 \Rightarrow C_1(t) = \frac{M}{GJ_p}$$

Таким чином $\Phi(x,t) = \frac{M}{GJ_p}x$, а значить для визначення функції $\Psi(x,t)$

маємо лінійне неоднорідне рівняння

$$\begin{aligned} \Psi_{tt} - \alpha^2 \Psi_{xx} = & -\Phi_{tt}(x,t) + \alpha^2 \Phi_{xx}(x,t) - F_z R_d f_{ph} \delta(x - x_0 - V_s t) + \\ & + \varepsilon \hat{\eta}(\Phi_t(x,t) + \Psi_t(x,t)) + \varepsilon \hat{\beta}_{xx}(x,t) \Psi_{xx}(x,t) \left[\frac{M}{GJ_p} + \Psi_x(x,t) \right]^2 \end{aligned} \quad (3.31)$$

і вона має задовольняти однорідні крайові умови (3.29).

За структурою рівняння (3.31) аналогічне до рівняння, яке описує відносні поздовжні коливання. Подібним чином як для поздовжніх коливань для аналізу відносних крутильних коливань використаємо загальні ідеї методів збурень, адаптованих до подібного класу рівнянь, маємо $\Psi(x,t) = \Psi_0(x,t) + \varepsilon \Psi_1(x,t)$. Відповідно до них, перш за все знайдемо вплив зовнішнього збурення на динаміку нанесення мікронерівностей, тобто знайдемо розв'язок головної частини вказаного рівняння, рівняння при $\varepsilon = 0$

$$\Psi_{0tt} - \alpha^2 \Psi_{0xx} = -F_z R_d f_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - V_s t) \quad (3.32)$$

Його розв'язок будемо шукати у вигляді

$$\Psi_0(x,t) = \sum_k T_k(t) \tilde{X}_k(x), \quad (3.33)$$

де система функцій $\{X_k(x)\}$ повинна задовольняти крайові умови $\tilde{X}(x)|_{x=0} = 0$,

$$X_x(x)|_{x=l_d} = 0. \text{ Такою системою функцій є } \{\tilde{X}_k(x)\} = \left\{ \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l_d} x \right\}.$$

Щодо функцій $T_k(t)$, то очевидно вони, як випливає із базового рівняння, повинні задовольняти неоднорідному рівнянню

$$\ddot{T}_k(t) + \alpha^2 \frac{1}{P_k} \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l_d} \right)^2 T_k(t) = -\frac{1}{P_k} \int_0^l F_z R_d f_{ph} \delta(x - x_0 - Vt) \tilde{X}_k(x) dx, \quad (3.34)$$

$$\text{де } P_k = \int_0^l \left[\sin \frac{(2k+1)\pi}{2l_d} x \right]^2 dx = \frac{l_d}{2}$$

Відповідно до властивостей дельта-функції [25] інтеграл у правій частині рівняння (3.30) приймає значення

$$\int_0^l \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l_d} x \delta(x - \bar{x}_0 - V_s t) dx = \sin \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l_d} (\bar{x}_0 + V_s t) \right), \quad \text{а відповідно вказане}$$

диференціальне рівняння трансформується до вигляду

$$\ddot{T}_k(t) + \omega_k^2 T_k(t) = -\frac{1}{P_k} F_z R_d f_{ph} \sin \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l_d} (\bar{x}_0 + V_s t) \right), \quad (3.35)$$

$$\text{де } \omega_k^2 = \alpha^2 \frac{1}{P_k} \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l_d} \right)^2$$

Таким чином, представлення дискретної дії зовнішнього навантаження на оброблювальну циліндричну поверхню за допомогою дельта-функції у поєднанні із методом часткової дискретизації і для випадку відносних крутильних коливань дозволяє розв'язати поставлену задачу, адже знайти розв'язок рівняння (3.31) не становить труднощів. Дійсно, рівняння (3.35) є лінійним неоднорідним, а отже загальний розв'язок відповідного йому однорідного має вигляд $T_{0k}(t) = T_0 \sin(\omega_k t + \mathcal{G}_{0k})$, і відповідний частинний розв'язок неоднорідного рівняння (3.31) можна представити у вигляді

$$\tilde{T}_k(t) = -\frac{1}{P_k} F_z r_d f_{ph} \frac{1}{\omega_k} \int_0^t \sin \omega_k (t - \tau) \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l_d} (\bar{x}_0 + V_s \tau) d\tau . \quad (3.36)$$

У сукупності отримані результати дозволяють описати багаточастотний динамічний процес відносних крутильних коливань циліндричного тіла в процесі нанесення на внутрішню його поверхню мікронерівностей у вигляді

$$\begin{aligned} \Psi_0(x, t) = & \frac{M}{GJ_p} x + \sum_k \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l_d} x \times \\ & \times \left\{ T_{0k} \cos(\omega_k t + \vartheta_0) - \frac{1}{P_k} F_z r_d f_{ph} \frac{1}{\omega_k} \int_0^t \sin \omega_k (t - \tau) \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l_d} (x - \bar{x}_0 - V_s \tau) d\tau \right\} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Що стосується першого наближення, тобто впливу нелінійних та дисипативних сил, то їх вплив визначається диференціальним рівнянням

$$\Psi_{1tt}(x, t) - \alpha^2 \Psi_{1xx}(x, t) = [\eta \Psi_{0t}(x, t)] + \hat{\beta} (\Psi_{0x}(x, t))^2 \Psi_{0xx}(x, t) \quad (3.38)$$

і його розв'язок знаходиться аналогічно до розв'язку рівняння (3.18) з тією різницею, що крайові умови, а відтак система власних функцій дещо інша. Останню не є перешкодою для подання функції $\varphi(x, t)$ у вигляді

$$\begin{aligned} \varphi(x, t) = & \sum_k \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l_d} x \times \\ & \times \left\{ \frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} r_d F_z \left(\frac{2k+1}{2l_d} \alpha \right)^{-1} \int_0^t \sin \frac{(2k+1)\pi(x_0 + V_s \tau)}{2l_d} \sin \left(\frac{2k+1}{2l_d} \pi \alpha (t - \tau) \right) d\tau + \frac{2l_d \varepsilon}{(2k+1)\pi \alpha} \int_0^t \cos \left(\alpha \frac{k\pi}{l_d} (t - \tau) \right) \bar{\Theta}(\tau) d\tau \right\} \end{aligned}$$

де $\bar{\Theta}(\tau)$ має вигляд

$$\bar{\Theta}(t) = \left\{ S_{0k} \bar{\omega}_k \cos(\bar{\omega}_k t + \varphi_{0k}) + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{l} \bar{f}_{ph} r_d F_Z \int_0^t \sin \frac{(2k+1)(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{2l_d} \sin \left(\frac{2k+1}{2l_d} \alpha(t-\tau) \right) d\tau \right] \right\} +$$

$$+ \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l_d} \right)^4 \hat{\beta} \frac{\pi}{8} \left\{ S_{0k} \sin(\bar{\omega}_k t + \varphi_{0k}) + \frac{1}{l} \bar{f}_{ph} r_d F_Z \int_0^t \sin \frac{(2k+1)(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{2l_d} \sin \left(\frac{2k+1}{2l} (t-\tau) \right) d\tau \right\}$$

Для практичного використання оцінку динаміки процесу можна проводити на базі головної моди [26, 27], тобто на базі співвідношення

$$\varphi(x, t) =$$

$$= \left\{ \frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} r_d F_Z \left(\frac{3\pi}{2l} \alpha \right)^{-1} \int_0^t \sin \frac{3\pi(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{2l_d} \sin \left(\frac{3}{2l_d} \pi \alpha(t-\tau) \right) d\tau + \frac{2l_d \varepsilon}{(2k+1)\pi \alpha} \int_0^t \cos \left(\pi \alpha \frac{3}{2l} (t-\tau) \right) \bar{\Theta}(\tau) d\tau \right\}$$

Нижче на рис. 3.5 представлено зміну відносного кута повороту для різних характеристик процесу нанесення мікрорельєфу.

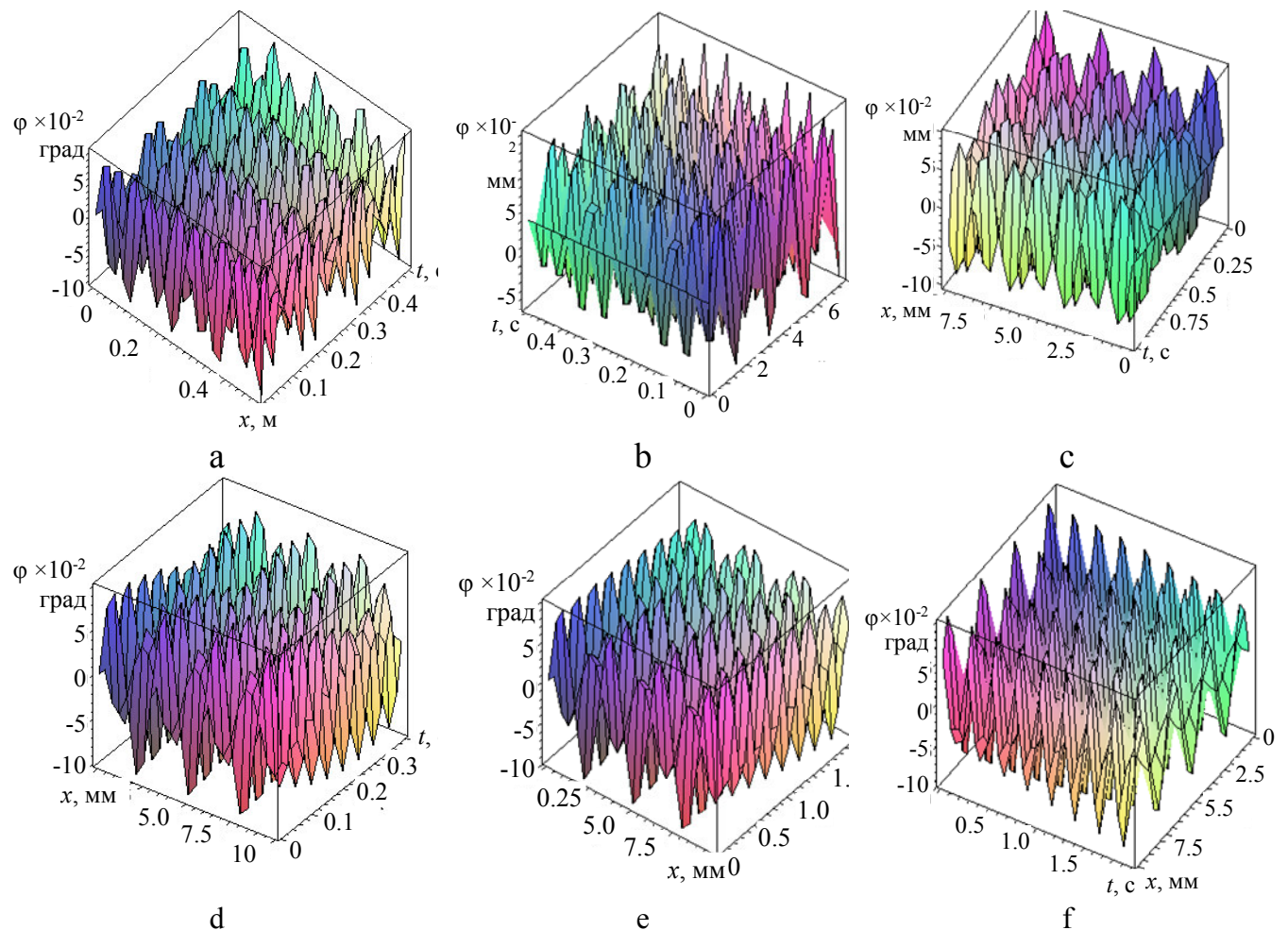


Рисунок 3.5. Зміна в часі відносного кута закручення за різних технологічних параметрів нанесення мікрорельєфу при: $R_d=0,06$ м; $r_d=0,05$ м

- a) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l_d = 0.5 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 300 \text{ Н}$ $V = 0,01 \text{ мс}^{-1}$ $\bar{f}_{ph} = 0,75$ $\omega = 3 \text{ с}^{-1}$
- b) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l_d = 0.75 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 300 \text{ Н}$ $V = 0,01 \text{ мс}^{-1}$ $\bar{f}_{ph} = 0,75$ $\omega = 3 \text{ с}^{-1}$
- c) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l_d = 1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 300 \text{ Н}$ $V = 0,01 \text{ мс}^{-1}$ $\bar{f}_{ph} = 0,75$ $\omega = 3$
- d) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l_d = 1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 300 \text{ Н}$ $V = 0,025 \text{ мс}^{-1}$ $\bar{f}_{ph} = 0,75$ $\omega = 3 \text{ с}^{-1}$
- e) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l_d = 1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 300 \text{ Н}$ $V = 0,05 \text{ мс}^{-1}$ $\bar{f}_{ph} = 0,75$ $\omega = 3 \text{ с}^{-1}$
- f) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l_d = 1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_x = 300 \text{ Н}$ $V = 0,05 \text{ мс}^{-1}$ $\bar{f}_{ph} = 0,75$ $\omega = 6 \text{ с}^{-1}$

3.3 Висновки до третього розділу

Розроблена у роботі методологія аналітичного опису технологічного процесу нанесення мікрорельєфу на внутрішню поверхню циліндричних деталей та отримані розрахункові залежності дають змогу стверджувати:

1. Конфігурація мікронерівностей залежать не тільки від кутової швидкості обертання тіла та складової привідного моменту, який примушує тіло обробки здійснювати відносний коливальний рух, але й пружних коливань самого тіла;

2. Особливістю останніх (як поздовжніх так і крутильних) є те, що вони зумовлені пружними властивостями тіла та зовнішньою дією сили, точка прикладання якої змінює своє відносне положення на внутрішній циліндричній поверхні, а відтак – відносні переміщення нормального поперечного перерізу оброблювального тіла у точці зовнішньої дії залежать від місця її знаходження;

3. Амплітудно-частотна характеристика відносних коливань (поздовжніх чи крутильних) залежить як від величини зовнішньої дії та фізико-механічних властивостей оброблювального тіла і для тіла із більш жорсткісними характеристиками частота пружних коливань є більшою, а амплітуда дещо меншою;

4. Отримані теоретичні результати динаміки процесу формування мікрорельєфу на циліндричній поверхні можуть бути базою для розв'язання

більш складних задач - дослідження зовнішніх та внутрішніх резонансних явищ у пружних оброблювальних тілах.

5. Достовірність отриманих розрахункових залежностей підтверджується отриманням у граничному випадку відомих, які стосуються процесу нанесення мікрорельєфу на циліндричну поверхню без урахування пружних коливань.

Розділ 4

НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ НА ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХНЯХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ

4.1. Класифікація частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання

Як вже зазначалось раніше фундаментальні дослідження в напрямку класифікації регулярних мікрорельєфів (РМ), визначення параметрів і встановлення їх впливу на якісні показники функціональних поверхонь деталей машин здійснено науковою школою під керівництвом Ю.Г. Шнейдера [265, 269] і регламентовано діючим стандартом ГОСТ 24773-81 [109].

В роботі [269] вперше подана класифікація способів утворення заглиблень на поверхнях деталей машин і приладів. За цією класифікацією ці заглиблення поділяють на два види: дискретні і неперервні. До дискретного виду віднесені заглиблення утворені такими способами: свердлінням за розміткою або в кондукторі; вихрове точіння; вихрове фрезерування; вібродинамічне обкочування і травлення через трафарет. До неперервного виду утворення заглиблень на поверхнях деталей машин віднесено наступні способи: проточування кільцевих і гвинтових канавок; проточування канавок складної форми за копіром; фрезерування канавок складної форми за копіром або з використанням верстатів з ЧПК; накатування профільним роликком; вібраційне обкочування; травлення після вібраційного обкочування.

Більш детальну класифікацію регулярних мікрорельєфів (РМ) сформованих вібраційним обкочуванням і її особливості запропоновано Шнейдером Ю.Г. [269]. Відповідно до [269] РМ поділяють на:

- класи – з елементами увігнутої форми і елементами випуклої форми;
- групи – із системами канавок і повністю нові мікрорельєфи;
- види – з канавками, які дотикаються, не дотикаються, перетинаються, сітчасті, синусоїдальні;

– типи – чотирикутні, шестикутні.

Діючий стандарт [109] регламентує класифікацію РМ дещо узагальнену, щодо повністю регулярних мікрорельєфів (ПРМ) і більш детальну відносно частково регулярних мікрорельєфів (ЧРМ). Згідно з ГОСТ 24773-81 ЧРМ поділяються на дві групи з: дискретними регулярними мікронерівностями (ДРМ) і неперервними регулярними мікронерівностями (НРМ). До ДРМ відносять регулярні мікронерівності границя яких являє собою замкнуту лінію. До НРМ віднесено регулярно розміщені мікронерівності границя яких являють собою дві незамкнуті лінії.

Окремої уваги заслуговує аналіз дослідження процесів формування РМ здійснений київською науковою школою під керівництвом Киричика П.О. [147–154]. Особливістю цих досліджень є те, що для забезпечення підвищення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин вперше було реалізовано поєднання дії різних фізико-технічних чинників. Формування РМР здійснювалось при одночасній взаємодії таких факторів: поверхнева пластична деформація і одночасне зміцнення; лазерне опромінювання зони деформування і комбінований вплив прозорих деформуючих елементів та тепловий імпульсний удар; комплексна оздоблювально-зміцнююча обробка. Для реалізації запропонованих технологічних процесів утворення РМР, враховуючи наявність різноманітного існуючого технологічно-інструментального оснащення, вперше запропонована класифікація пристроїв та деформуючих елементів. В основу цієї класифікації покладено технологічне забезпечення утворення РМР на робочих поверхнях деталей машин і їх експлуатаційні властивості.

Існуючі РМН на циліндричних і частково на плоских поверхнях досить повно і детально досліджені і роботах [153, 253, 265, 269]. В результаті встановлені параметри і характеристики ПРМ і ЧРМ.

Що стосується класифікації ЧРМ, що сформовані на торцевих поверхнях тіл обертання (ТПТО) і кінематики їх формування, то на даний час у науковій літературі ця проблема практично не висвітлена.

Тому запропоновані дослідження усувають цю прогалину і дозволяють створити класифікацію ЧРМ, які сформовані на ТПТО і обґрунтувати параметри таких мікрорельєфів, що в кінцевому результаті є основою для створення технологічних процесів формування ЧРМ на ТПТО.

При класифікації ЧРМ на ТПТО прийняті такі допущення.

1. Відношення частоти осциляцій деформуючого елемента і частоти обертання заготовки – величина постійна.

2. Сторони канавки (елемента поверхні з ЧРМ) V-подібного вигляду еквідистантно розміщені від осьової лінії регулярної мікронерівності приймаємо як прями лінії.

3. Кутовий крок ЧРМ на ТПТО величина постійна.

Класифікація ЧРМ на ТПТО побудована у вигляді ієрархічної системи: клас – ознаки класифікації – підознака – характеристики цих підознак, яка структуризована на основі кінематики технологічного процесу формування ЧРМ.

Ознаками класифікації запропоновано прийняти: способи формування ЧРМ; форму осьової лінії НРМ; взаємне розташування суміжних канавок; взаємне розміщення осьових ліній НРМ; форми канавок.

Кожна із цих ознак поділяється на певні підознаки, які складаються із відповідних характеристик, що виражаються елементами режиму вібраційного обкочування, розмірними параметрами елементів канавок, їх взаємним розміщенням.

Слід також відзначити, що запропонована класифікація містить підхід загальноприйнятої класифікації РМ згідно [109], зокрема за формою та видами канавок. (рис. 4.1).

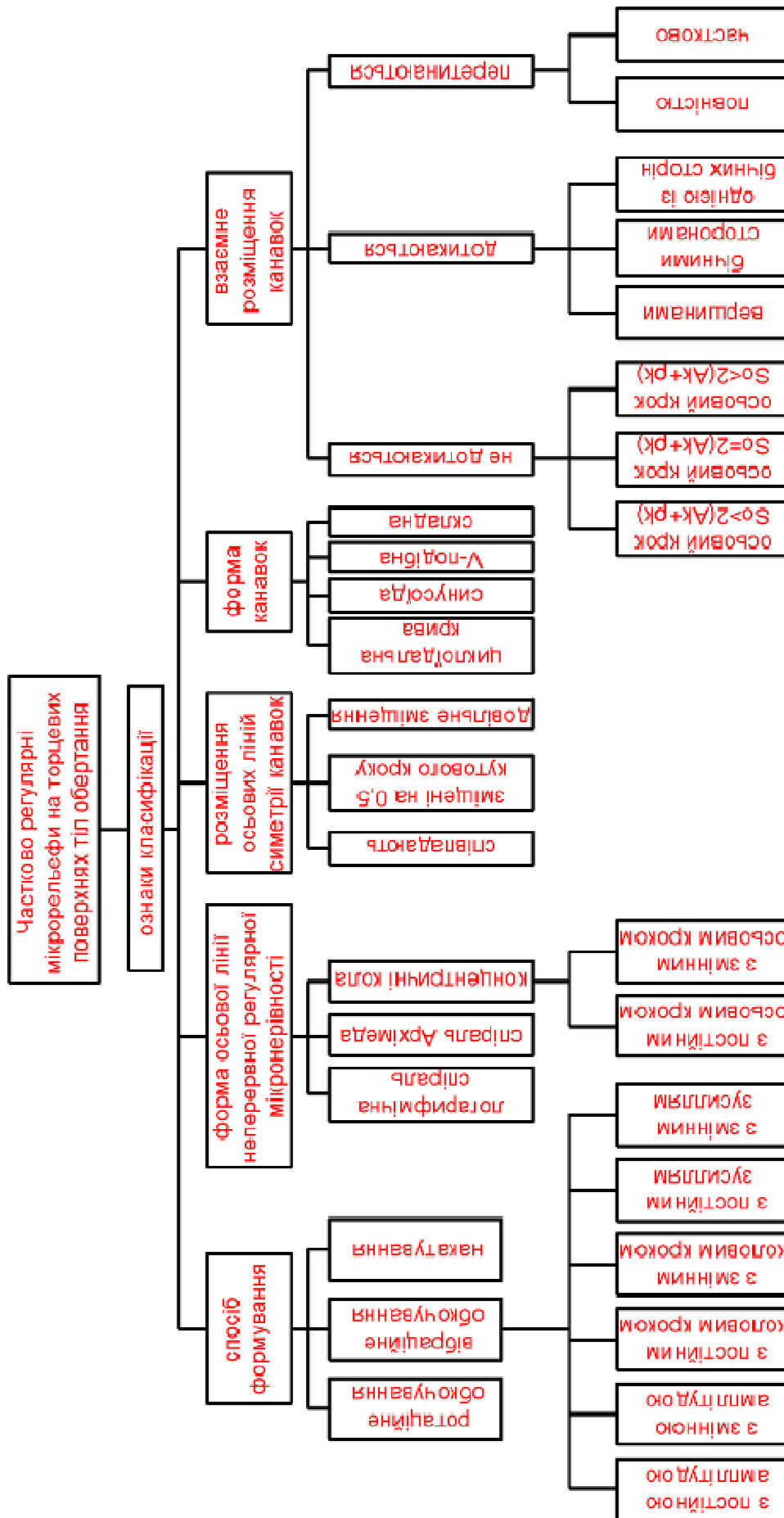


Рисунок 4.1 – Класифікація частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання [126]

Окрім цього ця класифікація дозволяє згенерувати велику кількість видів

ЧРМ, що формуються на ТПТО як вібраційним та і ротаційним методами. Кожна із запропонованих класифікаційних ознак чинить суттєвий вплив на геометричні параметри сформованого ЧРМ і, відповідно, на експлуатаційні властивості поверхні, на якій він сформований.

Необхідно відзначити, що внаслідок певних особливостей кінематики формування ЧРМ для ТПТО, окрім параметрів регламентованих в ГОСТ 24773-81 запропоновані параметри, які враховують саме ці особливості технологічного процесу формування ЧРМ на ТПТО.

Такими особливостями кінематики технологічного процесу формування ЧРМ на ТПТО є формування осьових ліній неперервних регулярних мікронерівностей у вигляді концентричних кіл, Архімедової та золотої спіралей. Тому одним із головних ознак класифікації ЧРМ сформованих на ТПТО будуть рівняння цих ліній.

Враховуючи особливості кінематики формування ЧРМ на ТПТО, які полягають в одночасному здійсненні відповідних погоджених рухів: обертового ТПТО, зворотно-поступального (осциляційного) і радіального деформуючого елемента на різних відстанях від центра ТПТО, при однакових за величиною кутових кроках будуть різними колові кроки НРМ (рис. 4.2). У випадку, коли осьові лінії НРМ являють собою концентричні кола із різними радіусами, то такий параметр, як признак класифікації, осьовий крок S_0 нерівностей може бути як постійним так і змінним. Для осьових ліній НРМ у вигляді спіралей: логарифмічної чи Архімеда величини осьових кроків S_0 будуть змінними або постійними відповідно.

На основі вищеподаного, ЧРМ сформовані на ТПТО запропоновано додатково класифікувати за характером як дискретної зміни радіусів колових кроків осьових ліній НРМ при концентричних колах так і при постійній зміні радіусів осьових ліній НРМ, виконаних у вигляді золотої спіралі та спіралі Архімеда.

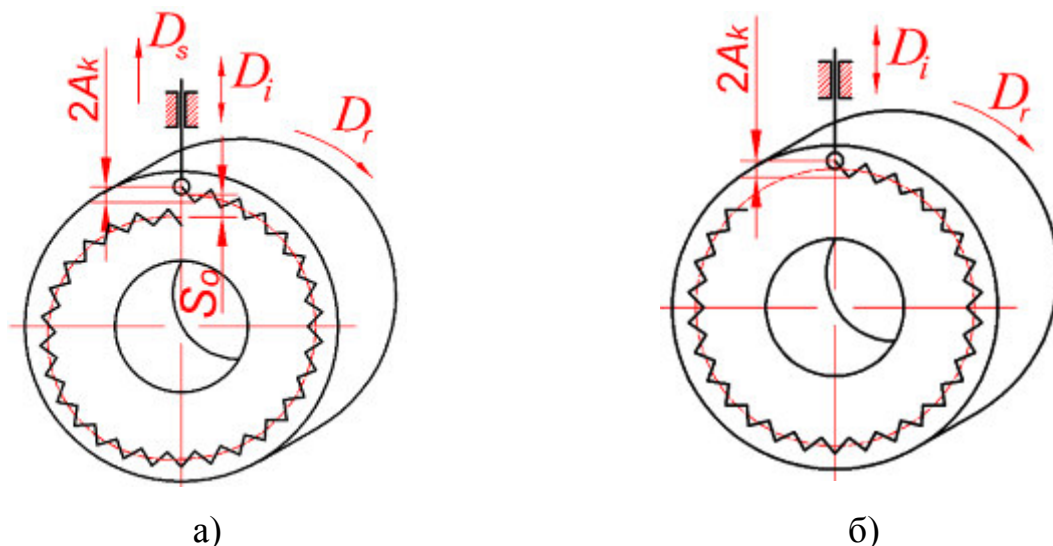


Рисунок 4.2 – Технологічні схеми формування ЧРМ на ТПТО із осьовими лініями неперервних регулярних мікронерівностей у вигляді: а) спіралі Архімеда; б) концентричного кола

Окрім цього необхідно враховувати характер зміни величини кутових кроків ЧРМ.

Додаткова класифікація ЧРМ сформованих на ТПТО, за характером зміни радіусів концентричних кіл r_i і осьового кроку S_{oi} проілюстровано на рис. 4.3.

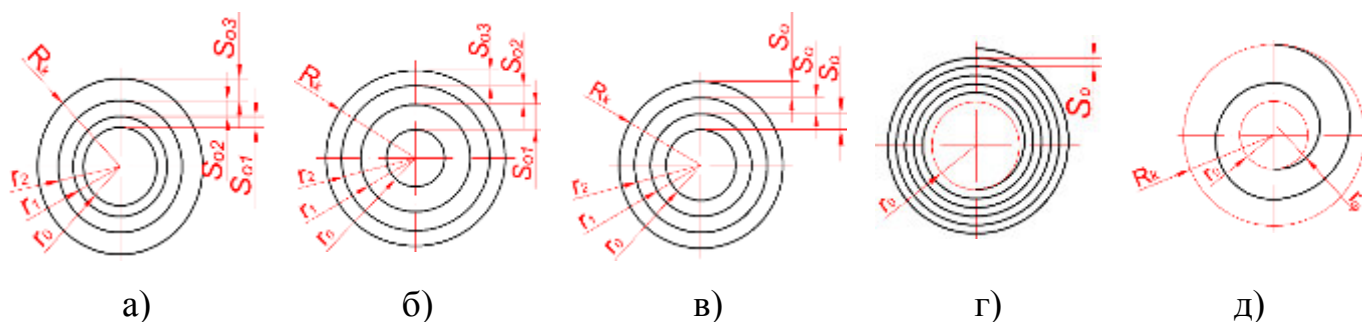


Рисунок 4.3 – Класифікація ЧРМ сформованих на ТПТО за характером дискретної і неперервної зміни радіусів r колових і спіральних осьових ліній НРМ і осьових кроків S_o

У випадку виконання осьових ліній НРМ у вигляді концентричних кіл з дискретним змінним і зростаючим від центра ТПТО до периферії радіусом r_i і дискретно зростаючим осьовим кроком S_{oi} мікронерівностей (рис. 4.3.а),

ознакою класифікації є умова $S_{o1} = r_1 - r_2 < S_{o2} = r_2 - r_1 < S_{o3} = R_k - r_2$

де S_{o1}, S_{o2}, S_{o3} – відповідно дискретно зростаючі осьові кроки, мм;

r_1, r_2 – біжучі значення радіусів осьових ліній НРМ, мм;

r_o і R_k – відповідно найменше і кінцеве значення радіусів осьових ліній НРМ, які встановлюються на основі аналізу конструкції поверхні деталі, якій потрібно формувати ЧРМ.

У випадку виконання осьових ліній НРМ у вигляді концентричних кіл з дискретним змінним і зростаючим від центра ТПТО до периферії осьовим кроком S_o , (рис. 4.3.б) ознакою класифікації є умова: $S_{o1} = r_1 - r_2 > S_{o2} = r_2 - r_1 > S_{o3} = R_k - r_2$.

У випадку виконання осьових ліній НРМ у вигляді концентричних кіл з дискретним змінним і зростаючим від центра ТПТО до периферії радіусом r і постійним за величиною осьовим кроком $S_o = \text{const}$, (рис. 4.3.в) ознакою класифікації є умова: $S_o = r_1 - r_0 = r_2 - r_1 = R_k - r_2 = \text{const}$.

Для ЧРМ сформованих на ТПТО коли осьова лінія НРМ виконана у вигляді спіралі Архімеда з постійним осьовим кроком (рис.4.3.г) $S_o = \text{const}$ ознака класифікації набуде вигляду:

$$r_\varphi = \frac{S_o \cdot \varphi \cdot \pi}{180^\circ}; \quad \varphi_o = \frac{r_o \cdot 180^\circ}{\pi \cdot S_o} \text{ (град)}; \quad \varphi_k = \frac{r_k \cdot 180^\circ}{\pi \cdot S_o} \text{ (град)}; \quad z_{S_o} = \frac{(R_k - r_k) \cdot 180^\circ}{\pi \cdot S_o}. \quad (4.1)$$

де r_φ – біжуче значення радіуса осьової лінії НРМ виконаної у вигляді Архімедової спіралі;

z_{S_o} – кількість осьових кроків.

У випадку виконання осьових ліній НРМ у вигляді «золотої» спіралі Архімеда (рис.4.3.д) ознака класифікації матиме вигляд:

$$r = \frac{a \cdot \varphi \cdot e^{0,3} \cdot \pi}{180^\circ}; \quad \varphi_o = \frac{r_o \cdot 180^\circ}{0,3 \cdot a \cdot \pi} \text{ (град)}; \quad \varphi_k = \frac{R_k \cdot 180^\circ}{0,3 \cdot a \cdot \pi} \text{ (град)}. \quad (4.2)$$

де a – постійна константа.

Таким чином запропонована класифікація ЧРМ сформованих на ТПТО, здійснена на основі особливостей кінематики технологічного процесу формування ЧРМ, яка може бути основою для створення математичних моделей ЧРМР і визначення відносної площі віброобробочування

4.2 Моделювання частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання вібраційним способом

Перш за все слід відмітити, що сформовані на торцевих поверхнях мікрорельєфи не є повністю регулярними, оскільки їх коловий крок на різній відстані від центра обертання поверхні буде різним. Тому такі мікрорельєфи віднесено до класу частково регулярних мікрорельєфів (ЧРМ), групи з неперервними регулярними нерівностями (НРМ).

Оскільки при формуванні ЧРМ на ТПТО можливе утворення множини варіантів канавок ЧРМ за рахунок різної форми осьових ліній НРМ, форми канавок, виду ЧРМ, взаємного розміщення осьових ліній симетрії канавок ЧРМ, то для побудови математичних моделей, які описують всю множину варіантів ЧРМ запропоновано використати блочний підхід. Суть його полягає в тому, що кожен ознаку канавок мікрорельєфу описують системою окремих математичних залежностей, а для генерування будь-якого ЧРМ із множини можливих варіантів ці математичні залежності поєднують між собою.

Запропонована схема утворення множини варіантів канавок ЧРМ сформованих на ТПТО вібраційним способом дає можливість згенерувати множину варіантів канавок ЧРМ з різними параметрами (рис. 4.4).

Кожен із параметрів, які формують характеристики канавок має своє математичне вираження (таблиця 4.1), таким чином об'єднавши їх в систему отримали математичні моделі будь-якого варіанту згенерованого за допомогою схеми утворення множини варіантів канавок ЧРМ (таблиця 4.2).

Кількість сформованих видів канавок є досить умовною, оскільки

кількість можливих форм канавок чи осьових ліній НРМ може бути набагато більшою.

Аналітичний опис сформованих на ТПТО ЧРМ за допомогою блочного підходу при моделюванні канавок дозволить автоматизувати розрахунки великої кількості параметрів мікрорельєфу, виходячи із можливостей технологічного обладнання, спростити розрахунки відносної площі мікрорельєфу проводити підбір параметрів мікрорельєфу та здійснювати моделювання його сітки в залежності від заданих параметрів.

При вібраційному способі формування частково регулярного мікрорельєфу торцевій поверхні надають обертового руху, а деформувальному елементу зворотно-поступального. Таким чином доцільно геометричні параметри канавок мікрорельєфу та параметри режимів обробки визначати за допомогою кута повороту φ_i цієї поверхні. Цей кут визначає вид мікрорельєфу: з канавками осі яких лежать на одній лінії (аналог паралельних канавок для РМР, сформованих на плоских або циліндричних поверхнях), або з канавками зміщеними на певну частку від кутового кроку.

Вихідними параметрами для моделювання ЧРМ на ТПТО є:

- амплітуда A_k канавки, мм;
- форма профілю канавок;
- коловий крок канавок S_k , мм, або залежний від нього параметр – центральний кут канавки α_k , град;
- осьовий крок канавок S_o , мм;
- кутовий крок канавок φ_k , град;
- відстань від центра обертання торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання» до основи елемента канавки ЧРМ R_k , мм;
- радіус середньої лінії канавок, R_{ks} , мм;
- радіус відбитка канавки, ρ_k , мм;
- кількість елементів ЧРМ n_{el} на проміжку $[0..2\pi]$, шт, визначається із залежності $n_{el} = i_{дв.х.}/n_3$,

де $i_{дв.х.}$ – кількість подвійних ходів віброобкатника, дв.х./хв.; n_3 – частота

обертання заготовки, об./хв.

– параметр, що характеризує розміщення осьових ліній симетрії канавок між собою γ_d , град, визначається як неповна частка від виразу $n_{el} = i_{дв.х}/n_3$.

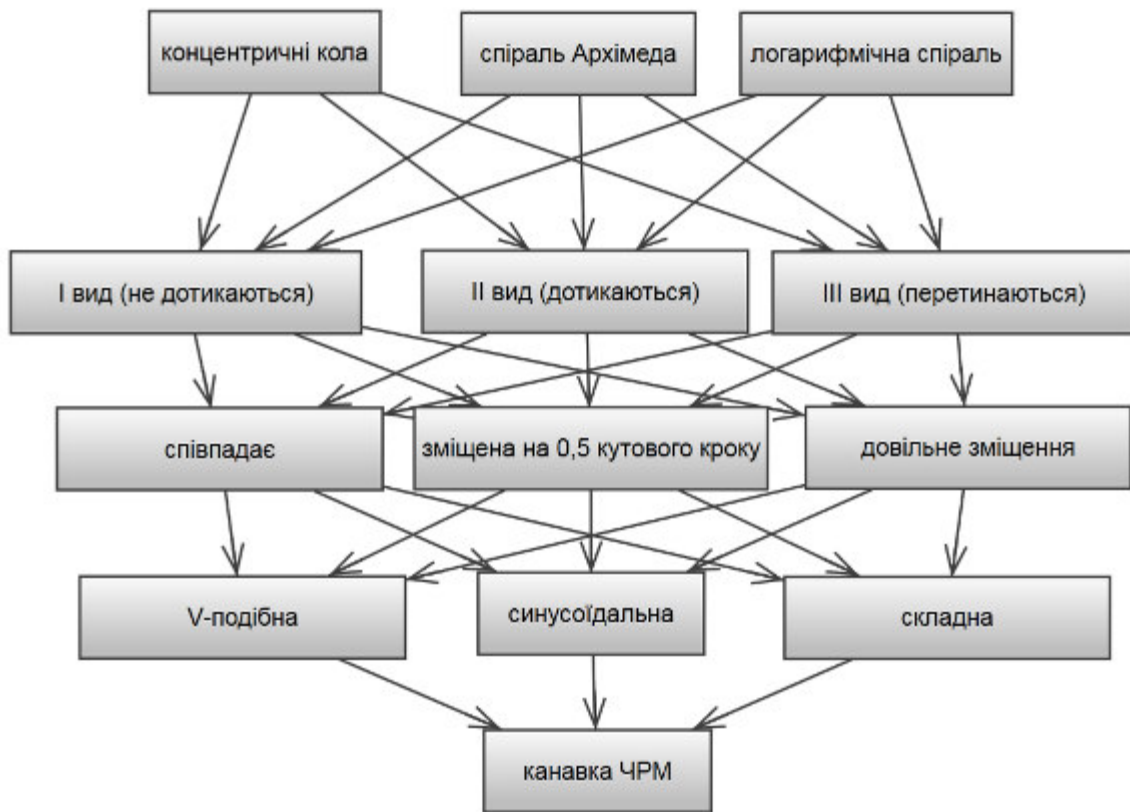


Рисунок 4.4 – Схема утворення множини варіантів канавок ЧРМ, що сформовані на торцевих поверхнях тіл обертання

Частота осциляцій деформувального елемента відносно торцевої поверхні, на якій формують мікрорельєф визначає кількість елементів канавок ЧРМ розміщених на відповідній відстані від центра обертання торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання» R_{kc} .

Назву ЧРМ, сформованого на ТПТО слід формувати наступним чином: спосіб формування → форма осьових ліній НРМ → вид → розміщення осьових ліній симетрії канавок → форма канавки.

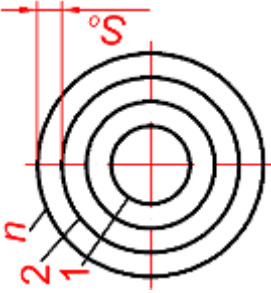
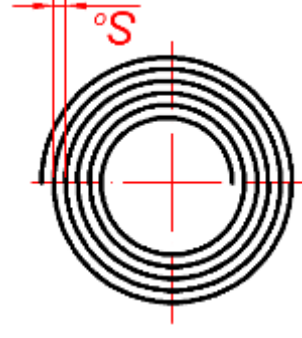
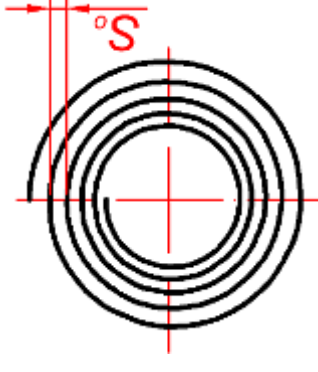
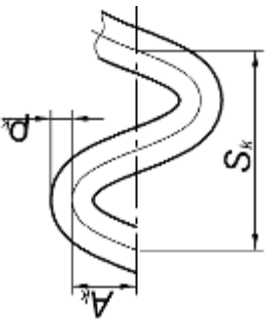
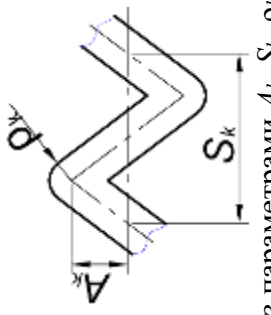
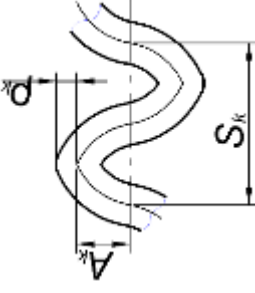
Для моделювання синусоїдальної форми канавки використовували функцію гармонічних коливань за законом синуса, яке записували у вигляді $y_k = A_k \cdot \sin(n_{el} \cdot \varphi_i)$; $x_k = A_k \cdot \cos(n_{el} \cdot \varphi_i)$,

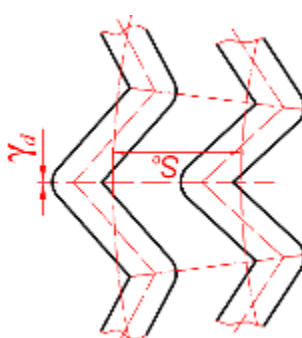
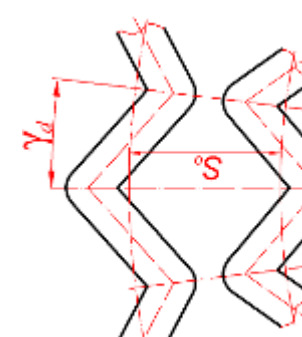
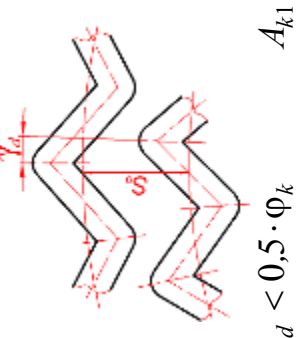
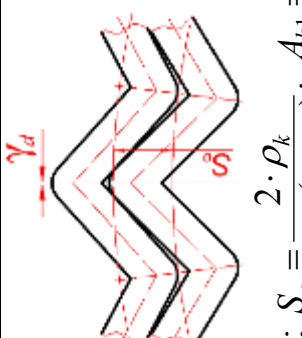
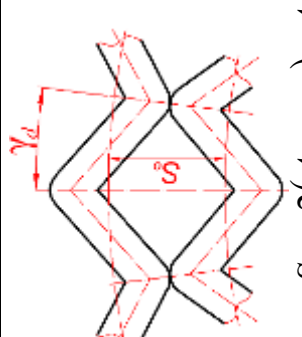
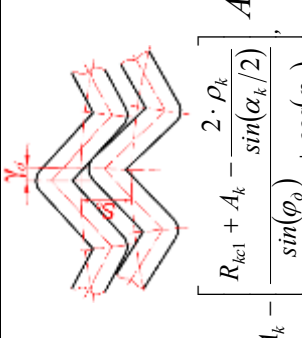
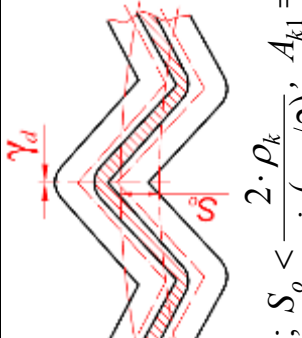
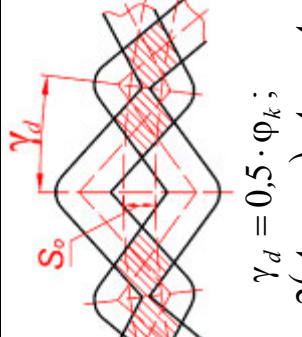
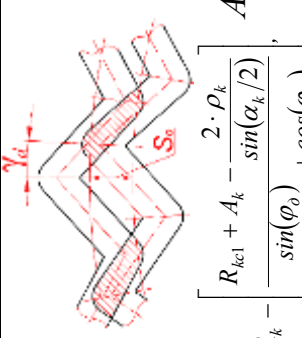
де y_k, x_k – координати канавки при відповідному куті повороту φ_i .

Для моделювання V-подібної форми канавки використовували функцію $x_k = A_k \cdot \arcsin(\sin(n_{el} \cdot \varphi_i))$, $y_k = A_k \cdot \arcsin(\sin(n_{el} \cdot \varphi_i))$. Дана функція є частково-кусковою, а її графік складається із прямих відрізків, які по чергово набувають екстремальних значень від $-A_k$ до $+A_k$ при $\varphi_i = \varphi_k/2$ і 0 – при $\varphi_i = \varphi_k$.

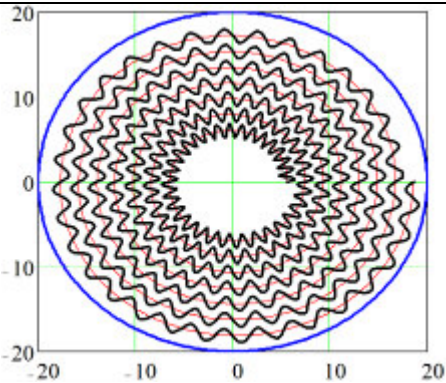
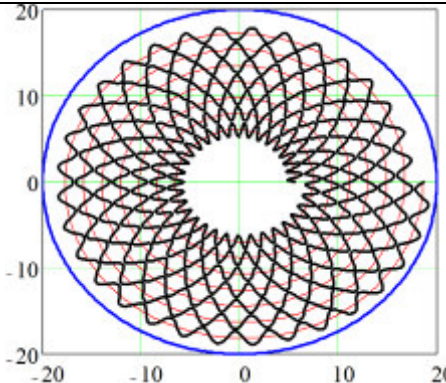
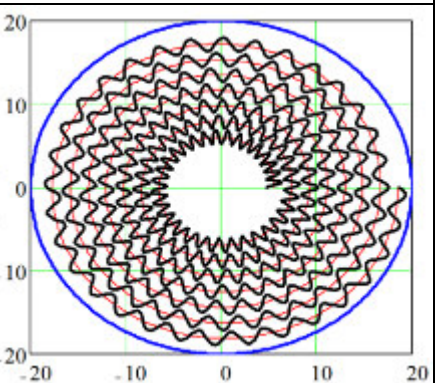
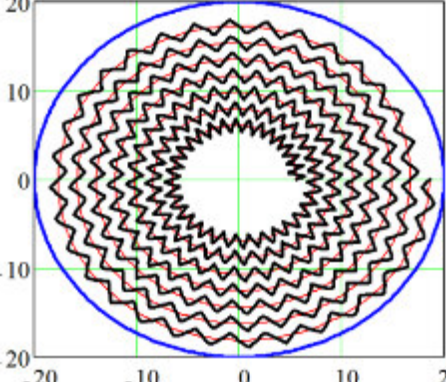
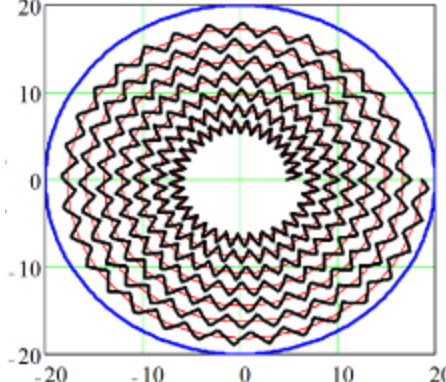
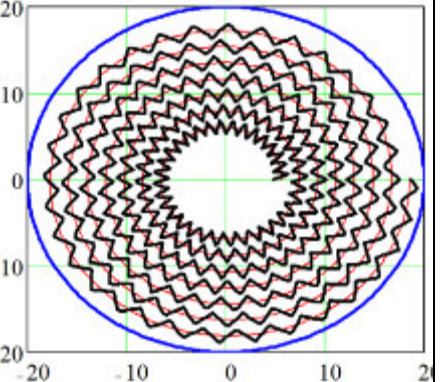
Для підтвердження працездатності розроблених математичних моделей побудуємо графічні зображення ЧРМ I вид для V-подібної та синусоїдальної форми канавок, що сформовані на ТПТО вібраційним способом для різних форм осьових ліній НРМ та з трьома варіантами розміщення осьових ліній симетрії канавок (таблиця 4.2).

Таблиця 4.1 – Характеристики осьових ліній НРМ, форм, видів канавок ЧРМ сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання вібраційним способом

за формою осьових ліній НРМ		
концентричні кола	спіраль Архімеда	логіарифмічна спіраль
 <p> $x_{in} = r_n \cdot \cos(\varphi_i)$; $y_{in} = r_n \cdot \sin(\varphi_i)$; $\varphi_i \in [0; 2\pi]$. </p> <p> n – порядковий номер кола концентричних кіл S_0 – крок концентричних кіл </p>	 <p> $x_i = S_0 \cdot \varphi_i \cdot \cos(\varphi_i) / 2 \cdot \pi$; $y_i = S_0 \cdot \varphi_i \cdot \sin(\varphi_i) / 2 \cdot \pi$; $\varphi_i \in [0; 2\pi \cdot z_{S_0}]$ </p> <p> z_{S_0} – к-ть витків спіралі; S_0 – осьовий крок канавок (відстань між витками спіралі). </p>	 <p> $x_i = a \cdot e^{m \cdot \varphi_i} \cdot \cos(\varphi_i)$; $y_i = a \cdot e^{m \cdot \varphi_i} \cdot \sin(\varphi_i)$; $\varphi_i \in [0; 2\pi \cdot z_{S_0}]$. </p> <p> m – коеф. відпов. за відстань між витками; a – коеф. відпов. за радіус витків z_{S_0} – к-ть витків спіралі. </p>
за формою канавки		
синусоїдальна	V-подібна	складна
 <p> з параметрами A_k, S_k, ρ_k $y_k = A_k \cdot \sin(n_{ел} \cdot \varphi_i)$; $x_k = A_k \cdot \cos(n_{ел} \cdot \varphi_i)$ </p>	 <p> з параметрами A_k, S_k, ρ_k $x_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin(\sin(n_{ел} \cdot \varphi_i))$; $y_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin(\sin(n_{ел} \cdot \varphi_i))$ </p>	 <p> з параметрами A_k, S_k, ρ_k $y_k = A_k \cdot f(\varphi_i)$; $x_k = A_k \cdot f(\varphi_i)$ </p>

за розміщенням осевих ліній симетрії каналок		вісь зміщена на певний кут	
вісь співпадає		вісь зміщена на 0,5 кутового кроку	
I вид	 <p style="text-align: center;">$\gamma_d = 0;$ $S_o > \frac{2 \cdot \rho_k}{\sin(\alpha_k/2)}, A_{k1} = A_{k2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$\gamma_d = 0,5 \cdot \varphi_k;$ $S_o > 2(A_k + \rho_k), A_{k1} = A_{k2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k \quad A_{k1} = A_{k2}$ $S_o > R_{kcl} + A_k - \left[\frac{R_{kcl} + A_k - \frac{2 \cdot \rho_k}{\sin(\alpha_k/2)}}{\frac{\sin(\varphi_0)}{\operatorname{tg}(\alpha_k/2)} + \cos(\varphi_0)} \right];$</p>
II вид	 <p style="text-align: center;">$\gamma_d = 0; S_o = \frac{2 \cdot \rho_k}{\sin(\alpha_k/2)}, A_{k1} = A_{k2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$\gamma_d = 0,5 \cdot \varphi_k; S_o = 2(A_k + \rho_k), A_{k1} = A_{k2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$S_o = R_{kcl} + A_k - \left[\frac{R_{kcl} + A_k - \frac{2 \cdot \rho_k}{\sin(\alpha_k/2)}}{\frac{\sin(\varphi_0)}{\operatorname{tg}(\alpha_k/2)} + \cos(\varphi_0)} \right], A_{k1} = A_{k2}$</p>
III вид	 <p style="text-align: center;">$\gamma_d = 0; S_o < \frac{2 \cdot \rho_k}{\sin(\alpha_k/2)}, A_{k1} = A_{k2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$\gamma_d = 0,5 \cdot \varphi_k;$ $S_o < 2(A_k + \rho_k), A_{k1} = A_{k2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$S_o < R_{kcl} + A_k - \left[\frac{R_{kcl} + A_k - \frac{2 \cdot \rho_k}{\sin(\alpha_k/2)}}{\frac{\sin(\varphi_0)}{\operatorname{tg}(\alpha_k/2)} + \cos(\varphi_0)} \right], A_{k1} = A_{k2}$</p>
за видами			

Таблиця 4.2 – Варіанти виконання частково регулярних мікрорельєфів на торцевих поверхнях тіл обертання

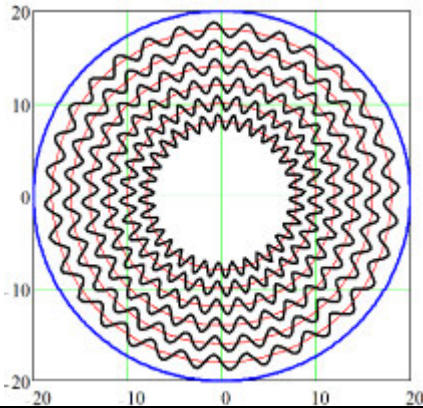
Назва частково регулярного мікрорельєфу		
<p>Вібраційний з виконанням осьових ліній НРМ по Архімедовій спіралі, синусоїдальний, I виду.</p> $\begin{cases} x_i = [S_o \cdot \varphi_i \cdot \cos(\varphi_i)] / 2 \cdot \pi \\ y_i = [S_o \cdot \varphi_i \cdot \sin(\varphi_i)] / 2 \cdot \pi \\ x_k = A_k \cdot \sin(\varphi_i \cdot n_{el}) \cdot \cos(\varphi_i) + x_i \\ y_k = A_k \cdot \sin(\varphi_i \cdot n_{el}) \cdot \sin(\varphi_i) + y_i \end{cases}$		
$\gamma_d = 0$	$\gamma_d = 0,5 \cdot \varphi_k$	$0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k$
		
<p>Вібраційний з виконанням осьових ліній НРМ по Архімедовій спіралі, V-подібної форми, I виду</p> $\begin{cases} x_i = [S_o \cdot \varphi_i \cdot \cos(\varphi_i)] / 2 \cdot \pi \\ y_i = [S_o \cdot \varphi_i \cdot \sin(\varphi_i)] / 2 \cdot \pi \\ x_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin(\sin(n_{el} \cdot \varphi_i)) \cdot \cos(\varphi_i) + x_i \\ y_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin(\sin(n_{el} \cdot \varphi_i)) \cdot \sin(\varphi_i) + y_i \end{cases}$		
$\gamma_d = 0$	$\gamma_d = 0,5 \cdot \varphi_k$	$0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k$
		

Вібраційний з виконанням осьових ліній НРМ по концентричних колах, синусоїдальний, I виду

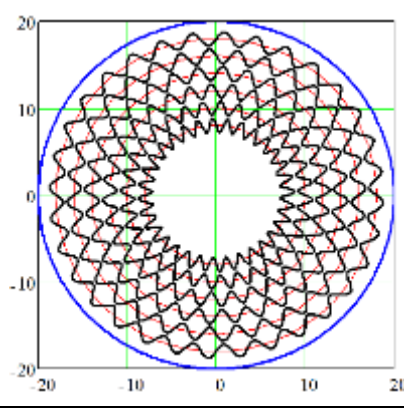
$$r_{n+1} = r_n + S_o$$

$$\begin{cases} x_{in} = r_n \cdot \cos(\varphi_i) \\ y_{in} = r_n \cdot \sin(\varphi_i) \\ x_k = A_k \cdot \sin((\varphi_i + \gamma_d) \cdot n_{en}) \cdot \cos(\varphi_i) + x_{in} \\ y_k = A_k \cdot \sin((\varphi_i + \gamma_d) \cdot n_{en}) \cdot \sin(\varphi_i) + y_{in} \end{cases}$$

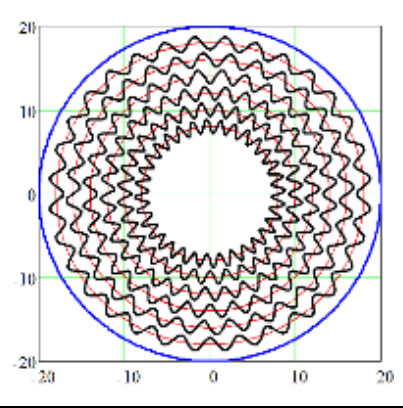
$\gamma_d=0$



$\gamma_d=0,5 \cdot \varphi_k$



$0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k$;

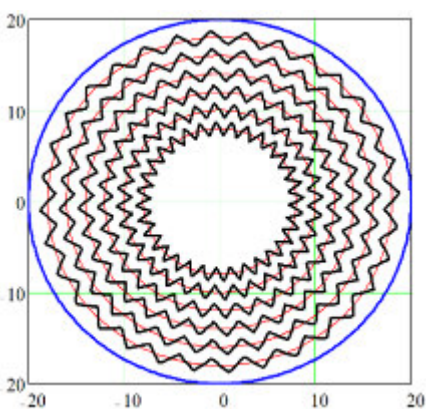


Вібраційний з виконанням осьових ліній НРМ по концентричних колах, V-подібної форми, I виду

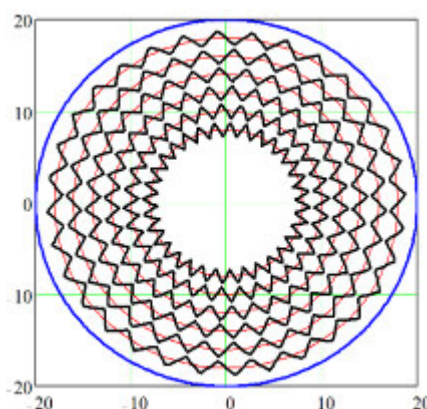
$$r_{n+1} = r_n + S_o$$

$$\begin{cases} x_{in} = r_n \cdot \cos(\varphi_i) \\ y_{in} = r_n \cdot \sin(\varphi_i) \\ x_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin[\sin((\varphi_i + \gamma_d) \cdot n_{en})] \cdot \cos(\varphi_i) + x_i \\ y_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin[\sin((\varphi_i + \gamma_d) \cdot n_{en})] \cdot \sin(\varphi_i) + y_i \end{cases}$$

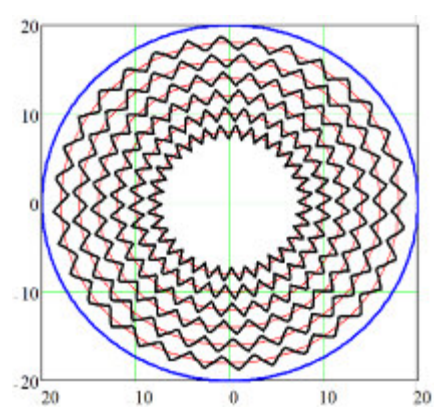
$\gamma_d=0$



$\gamma_d=0,5 \cdot \varphi_k$



$0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k$;



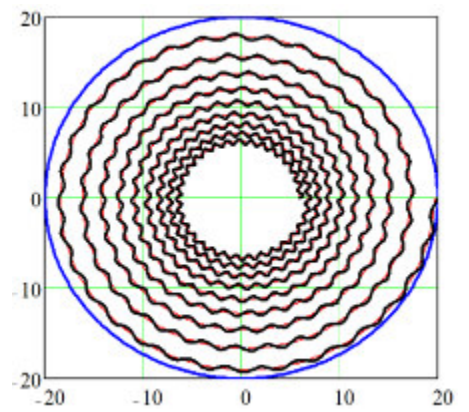
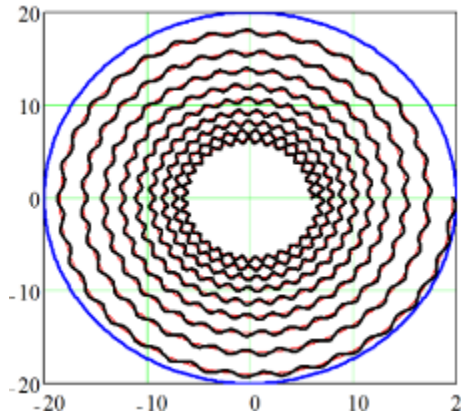
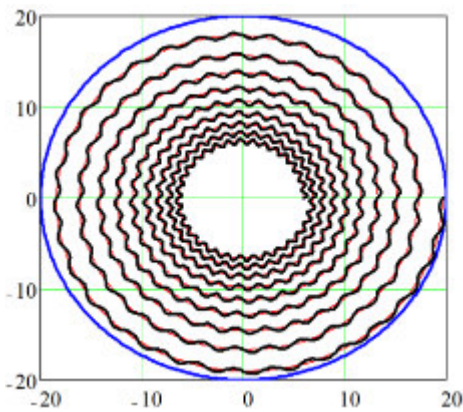
Вібраційний з виконанням осьових ліній НРМ по логарифмічній спіралі, синусоїдальний, I виду

$$x_i = a \cdot e^{m \cdot \varphi_i} \cdot \cos(\varphi_i)$$

$$y_i = a \cdot e^{m \cdot \varphi_i} \cdot \sin(\varphi_i)$$

$$x_k = A_k \cdot \sin(\varphi_i \cdot n_{ел}) \cdot \cos(\varphi_i) + x_i$$

$$y_k = A_k \cdot \sin(\varphi_i \cdot n_{ел}) \cdot \sin(\varphi_i) + y_i$$

 $\gamma_d=0$ $\gamma_d=0,5 \cdot \varphi_k$ $0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k$ 

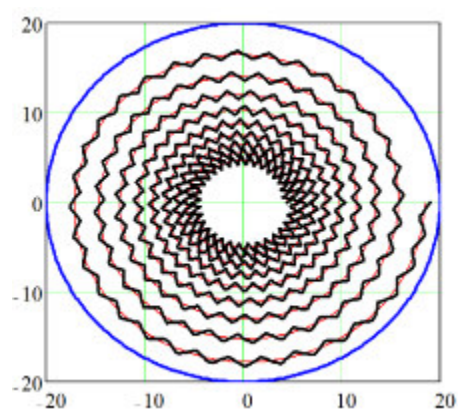
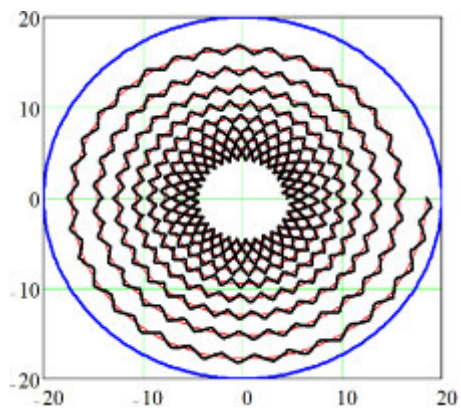
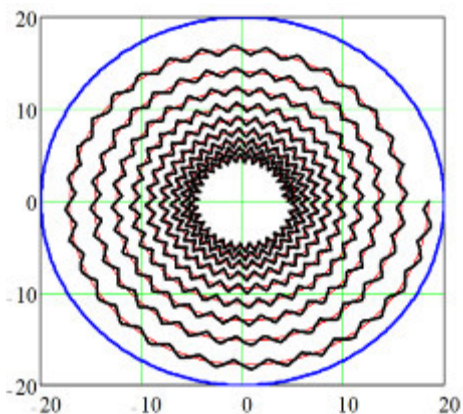
Вібраційний з виконанням осьових ліній НРМ по логарифмічній спіралі, V-подібної форми, I виду

$$x_i = a \cdot e^{m \cdot \varphi_i} \cdot \cos(\varphi_i)$$

$$y_i = a \cdot e^{m \cdot \varphi_i} \cdot \sin(\varphi_i)$$

$$x_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin(\sin(n_{ел} \cdot \varphi_i)) \cdot \cos(\varphi_i) + x_i$$

$$y_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin(\sin(n_{ел} \cdot \varphi_i)) \cdot \sin(\varphi_i) + y_i$$

 $\gamma_d=0$ $\gamma_d=0,5 \cdot \varphi_k$ $0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k$ 

4.3 Визначення площі канавок трикутної форми частково регулярного мікрорельєфу сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання»

Формуючи частково-регулярні мікрорельєфи (ЧРМ) вібраційним методом на торцевих поверхнях тіл обертання з однаковими режимами обробки (кутовою швидкістю обертання заготовки ω , амплітудою A та кількістю осциляцій i) отримуємо канавки з різним коловим кроком S_k і, відповідно, різною відносною площею F_n . Причиною цьому є те, що при обертанні заготовки з однаковою кутовою швидкістю ω , віброобкатник на різній відстані від центра обертання торцевої поверхні пройде різний шлях, а отже і значення колового кроку нерівностей S_k , який впливає на площу канавок F_n . буде різним (рис. 4.5). Тому слід відмітити, що мікрорельєфи, що сформовані на торцевих поверхнях тіл обертання є умовно регулярними. Оскільки їх коловий крок S_k буде зменшуватись із наближенням до центра обертання такої поверхні.

Тому є доцільним введення поняття кутового кроку канавки – μ_k , який буде мати постійне значення на будь-якій відстані від центру обертання торцевої поверхні.

Коефіцієнт зменшення колового кроку μ_k визначено за формулою:

$$\mu_k = S_{k1}/S_{k2} \quad (4.3)$$

Площа, яку займають елементи ЧРМ, які розміщені на торцевій поверхні визначається за формулою:

$$F_{PMP} = F_{el} \cdot N_{el}. \quad (4.4)$$

Кількість елементів розміщених на колі торцевої обертової поверхні радіусом R_k визначається за формулою:

$$N_{el} = \frac{360^\circ}{\varphi_k} \quad (4.5)$$

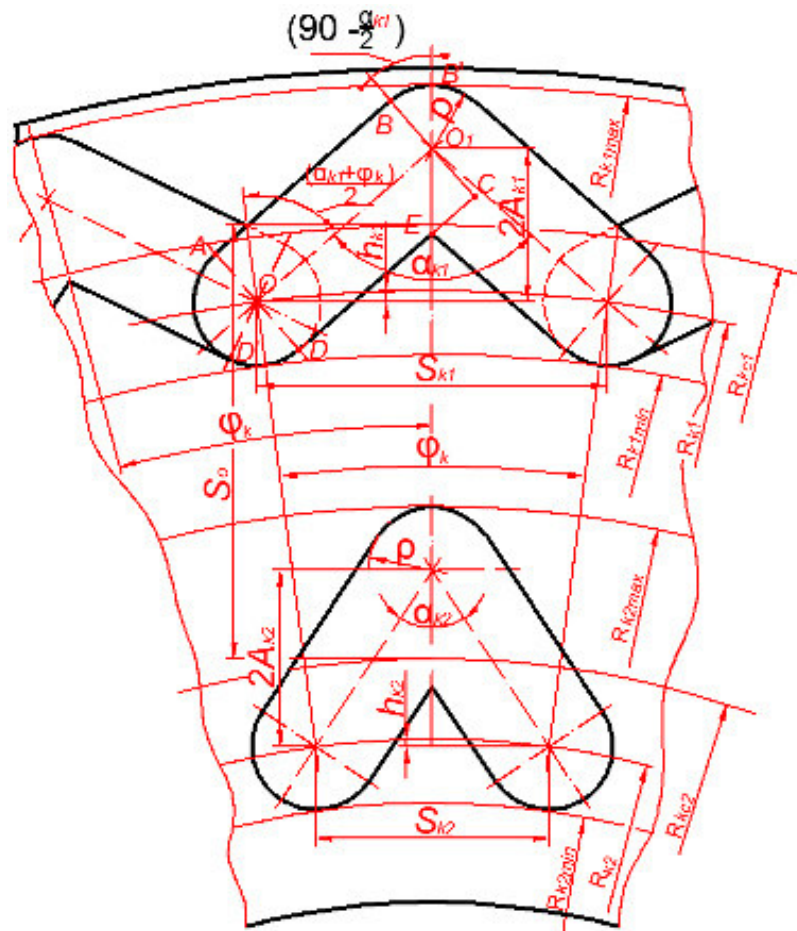


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема для визначення площі елементів канавок трикутного профілю ЧРМ, сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання»

Коловий крок елемента нерівності дорівнює довжині хорди дуги кола на якому він розміщений

$$S_k = 2R_k \sin\left(\frac{\varphi_k}{2}\right), \quad (4.6)$$

де φ_k – центральний кут, який відповідає одному елементу ЧРМ розміщеному на дузі кола радіусом R_k .

Звідси

$$\varphi_k = 2 \arcsin \left(\frac{S_k}{2R_k} \right). \quad (4.7)$$

Амплітуда A_k елемента ЧРМ, коловий кроком S_k і кут α_k пов'язані залежністю:

$$A_k = \frac{S_k}{4 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_k/2)}. \quad (4.8)$$

Звідси

$$S_k = 4 \cdot A_k \cdot \operatorname{tg}(\alpha_k/2). \quad (4.9)$$

$$\alpha_k = 2 \cdot \operatorname{arctg}(S_k/4 \cdot A_k). \quad (4.10)$$

Між кутами α_k і φ_k існує залежність

$$\alpha_k = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{R_k \sin(\varphi_k/2)}{A_k} \right]. \quad (4.11)$$

Площу одного елемента ЧРМ визначено за формулою дорівнює сумі площ двох прямокутників $ABCD$, без двох трикутників AOF і двох трикутників EO_1C , а також площі двох секторів BO_1B' , площі двох секторів DOD' :

$$F_{el} = \frac{2 \cdot \rho_k \cdot S_k}{\cos\left(90 - \frac{\alpha_k}{2}\right)} - \frac{2 \cdot \rho_k^2 \cdot \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_k + \varphi_k}{2}\right)}{2} - \frac{2 \cdot \rho_k^2 \cdot \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_k}{2}\right)}{2} + \quad (4.12)$$

$$+\frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_k^2 \cdot \left(90 - \frac{\alpha_k}{2}\right)}{360^\circ} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_k^2 \cdot \left(90 - \frac{\alpha_k + \varphi_k}{2}\right)}{360^\circ}.$$

Спростивши вираз отримаємо

$$F_{el} = \frac{2 \cdot \rho_k \cdot S_k}{\sin(\alpha_k/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_k - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_k + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \right] \quad (4.13)$$

а використавши формулу (4.9) отримаємо вираз без значення S_k

$$F_{el} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot A_k}{\cos(\alpha_k/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_k - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_k + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \right] \quad (4.14)$$

Так як площа не може бути від'ємною, з рівняння (4.13) виведемо умову мінімального значення параметра S_k елемента ЧРМР.

$$\frac{2 \cdot \rho_k \cdot S_k}{\sin(\alpha_k/2)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_k - 0,5\varphi_k)}{360^\circ} > \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_k + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \right], \quad (4.15)$$

звідси

$$S_k > \left[\frac{\rho_k \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_k + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \right]}{2} - \frac{\pi \cdot \rho_k (180 - \alpha_k - 0,5 \cdot \varphi_k)}{360^\circ} \right] \cdot \left[\sin\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \right]. \quad (4.16)$$

Таку ж умову можна вивести і для інших параметрів при яких F_{el} буде набувати додатніх значень.

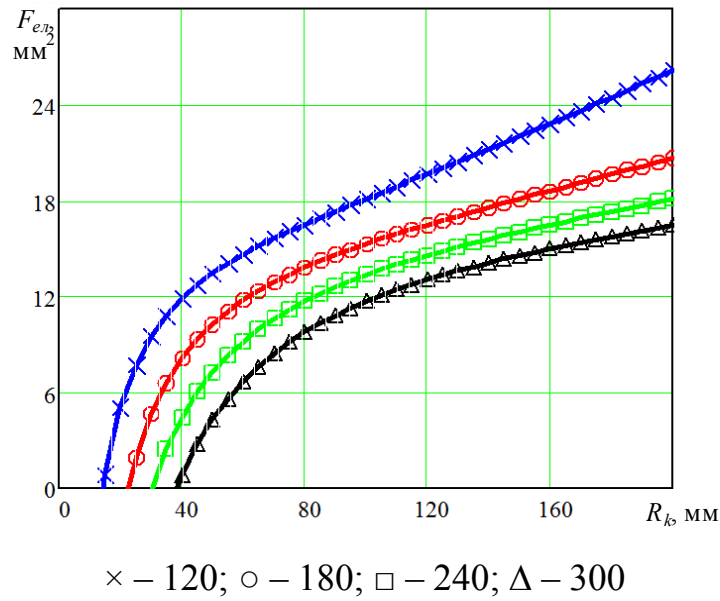


Рисунок 4.6. Залежність площі елемента ЧРМ від радіуса R_k для $A_k=2\text{мм}$, $\rho_k=1\text{ мм}$ з різними значеннями кількості елементів N_{el}

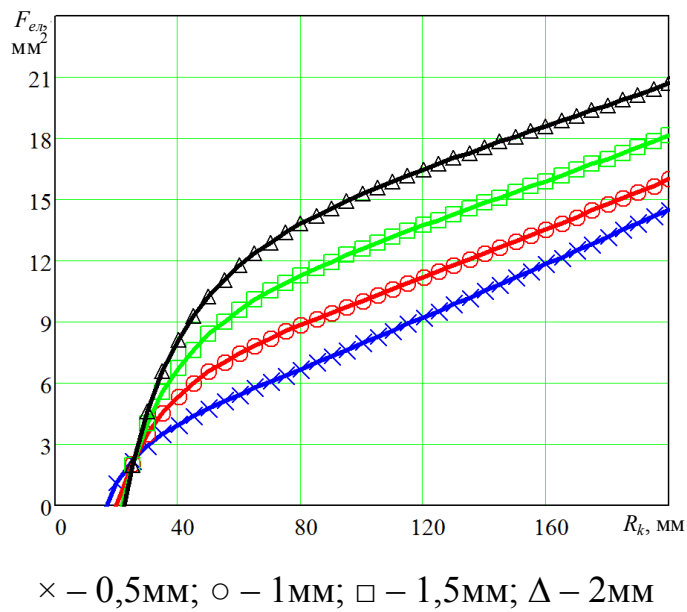


Рисунок 4.7. Залежність площі елемента ЧРМ від радіуса R_k для $N_{el}=180$, $\rho_k=1\text{ мм}$ з різними значеннях амплітуди A_k

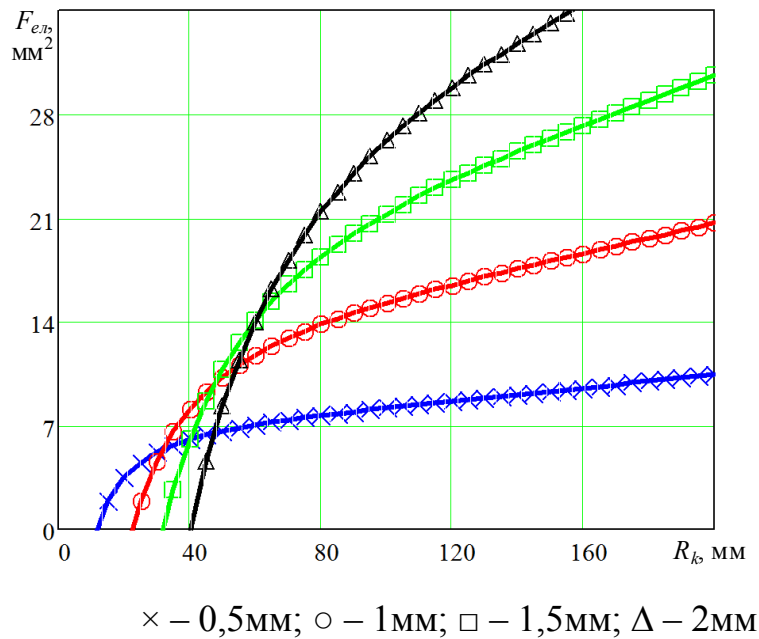


Рисунок 4.8 – Залежність площі елемента ЧРМ від радіуса R_k для $N_{el}=180$, $A_k=2$ мм з різними значеннями радіуса канавки ρ_k

Отже площа, яку займають елементи ЧРМ, які розміщені на колі радіусом R_k визначається за формулою:

$$F_n = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot A_k}{\cos(\alpha_k/2)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_k - 0,5\varphi_k)}{360^\circ} - \rho_k^2 \left[\text{ctg} \left(\frac{\alpha_k + \varphi_k}{2} \right) + \text{ctg} \left(\frac{\alpha_k}{2} \right) \right] \cdot N_{el} \quad (4.17)$$

Використавши формулу (4.14) побудовано залежність площі елемента ЧРМ від радіуса R_k для різних значень параметрів A_k , ρ_k та N_{el} .

Проаналізувавши графічні залежності (рис.4.6-4.8) робимо висновок про те, що при формуванні ЧРМ на торцевих поверхнях тіл обертання при однакових технологічних режимах оброблення, зокрема: амплітуді A_k , радіусі канавки ρ_k , кількості обертів заготовки, площа елементів канавок буде змінюватись із зміною відстані R_k до центра обертання торцевої поверхні. В діапазоні значень параметра R_k в межах від 40 до 160 мм значення площі елемента канавки для однакових технологічних режимів оброблення може збільшитись від

3 до 6 разів. Для забезпечення стабільних фізико-механічних властивостей робочої поверхні з ЧРМР площа елементів канавок повинна бути однаковою. Для цього доцільним є забезпечення параметра A_k – амплітуди коливань віброобкатника в залежності від величини параметра R_k . Крім цього з отриманих графічних залежностей бачимо, що найбільший вплив на зміну площі елемента канавки ЧРМР, сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання», має зміна величини радіуса канавки ρ_k . (рис. 4.8).

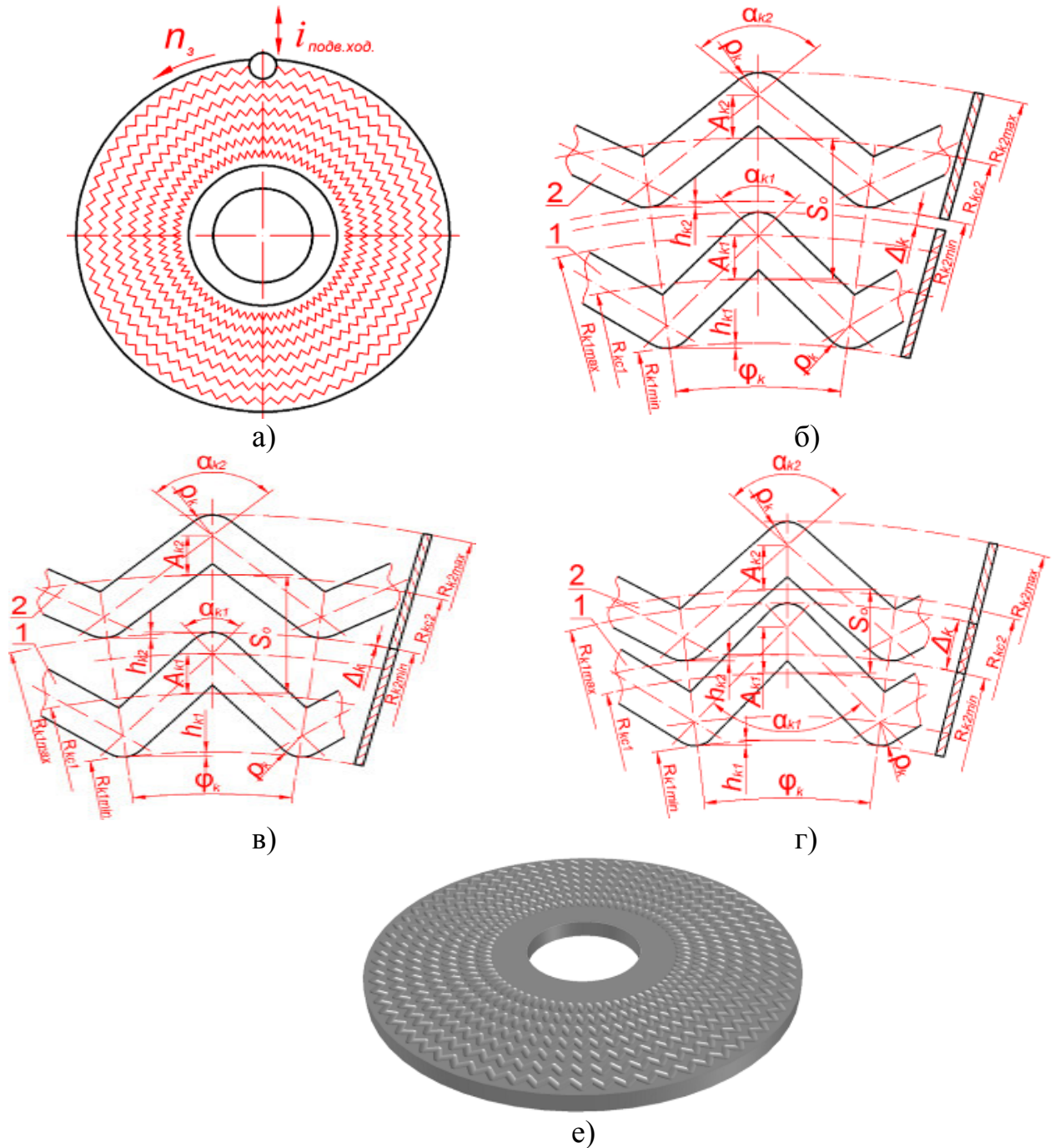
З метою забезпечення однакових значень площі елементів канавок ЧРМ сформованого на різних діаметрах торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання» необхідно здійснювати регулювання амплітуди коливань A_k віброобкатника, числове значення якої необхідно визначати із залежності (4.14).

4.4. Визначення оптимальних параметрів канавок частково регулярного мікрорельєфу I типу сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання

Однакові фізико-механічні властивості торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання» (ТПТО) потребують забезпечення однакового значення відносної площі ЧРМ в будь-якій її частині.

Тож метою дослідження даного підрозділу є визначення амплітуди коливань деформувального елемента при формування частково регулярних мікрорельєфів I типу із співвісними канавками V-подібної форми, сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання з метою забезпечення однакової відносної площі віброобкочування.

Оскільки частково регулярний мікрорельєф формується при однаковому зусиллі деформувального елемента, а фізико-механічні властивості торцевої поверхні матеріалу вважатимемо стабільними, то радіус і глибину відбитка деформувального елемента також вважатимемо однаковими в будь-якій точці канавки мікрорельєфу.



а – загальний вигляд торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання» з сформованим ЧРМ; б – розміщення канавок з параметром $\Delta_k > 0$, в – розміщення канавок з параметром $\Delta_k = 0$; г – розміщення канавок з параметром $\Delta_k < 0$; е) 3D-деталі із торцевою поверхнею деталей класу «тіла обертання»;


 – діапазон значень діаметрів торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання», на яких розміщені канавки ЧРМ

Рисунок 4.9 – Схема розміщення канавок частково регулярного мікрорельєфу сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання

Однак врахувавши різні схеми розміщення канавок (рис. 4.9 а) враховували і площу торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання» розташовану між канавками, яка характеризується параметром Δ_k і буде чинити вплив на параметр F_n .

При формуванні ЧРМ на торцевих поверхнях тіл обертання можливі три схеми взаємного розміщення канавок в осьовому напрямі по відношенню до осьового кроку S_o канавки ЧРМ:

- залишають поверхню у вигляді кільця обмеженого радіусами R_{k1min} і R_{k2min} на якій канавки ЧРМ не сформовані $\Delta_k > 0$ (рис. 4.9 б);
- займають усю поверхню $\Delta_k = 0$ (рис. 4.9 в);
- мають спільну поверхню $\Delta_k < 0$ (рис. 4.9 г).

Слід відмітити, що при формуванні ЧРМ із змінною амплітудою коливань схеми взаємного розміщення канавок можуть змінюватись переходячи із схеми з параметром $\Delta_k > 0$ в схему $\Delta_k = 0$ і далі в схему з $\Delta_k < 0$.

Розрахунок геометричних параметрів частково регулярного мікрорельєфу рельєфу. Площу F_n згідно [109, 269] визначали як:

$$F_n = \frac{F_{PMP}}{F_{пов}}, \quad (4.18)$$

$$F_{PMP} = F_{ел} \cdot n_{ел}. \quad (4.19)$$

де $F_{ел}$ – площа канавки ЧРМ, мм²;

$n_{ел}$ – кількість елементів на колі радіусом R_{kc} на проміжку $[0..2\pi]$, шт.

Оскільки габарити канавки обмежені радіусами R_{kmax} і R_{kmin} , то площа поверхні кільця, на якій розміщені канавки ЧРМ на проміжку $[0..2\pi]$ визначали за формулою:

$$F_{нов} = \pi \cdot (R_{k\max}^2 - R_{k\min}^2) \quad (4.20)$$

З врахуванням (4.19) і (4.20) формула (4.18) набуде вигляду

$$F_{ні} = \frac{F_{елі} \cdot n_{ел}}{\pi \cdot (R_{ki\max}^2 - R_{ki\min}^2)}; \quad (4.21)$$

де $R'_{ki\max}$, $R'_{ki\min}$ – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри, які описують межі i -тих канавок з врахуванням параметра Δ_k .

Визначено значення параметрів $R'_{k\max}$ та $R'_{k\min}$ для канавок розміщених на різній відстані до центра обертання ТПТО. Відповідно індексом 1 будемо позначати параметри елемента канавки, який вже сформовано і розміщено ближче до осі обертання ТПТО, а індексом 2 – параметри елемента канавки, який потрібно сформувати, забезпечивши однакову відносну площу ЧРМ і який розміщений далі до осі обертання ТПТО.

$$\begin{aligned} R'_{k1\max} &= R_{kc1} + A_{k1} + \rho_k + \Delta_k/2 \\ R'_{k1\min} &= R_{kc1} - A_{k1} - \rho_k + h_{k1} - \Delta_k/2 \end{aligned} \quad (4.22)$$

а для канавки розміщеної далі від центра обертання ТПТО з врахуванням того, що $R_{kc2} = R_{kc1} + S_0$ вираз (4.22) набуде вигляду

$$\begin{aligned} R'_{k2\max} &= R_{kc1} + S_0 + A_{k2} + \rho_k + \Delta_k/2 \\ R'_{k2\min} &= R_{kc1} + S_0 - A_{k2} - \rho_k + h_{k2} - \Delta_k/2 \end{aligned} \quad (4.23)$$

де h_{ki} – висота хорди кола радіусом R_{ki} , мм;

Висоту хорди знаходимо із залежності $h_{k1} = R_{k1} [1 - \cos(\varphi_k/2)]$ та з врахуванням того, що $R_{k1} = R_{kc1} - A_{k1} + h_{k1}$ отримаємо

$$h_{ki} = \frac{(R_{kci} - A_{ki}) \cdot [1 - \cos(\varphi_k/2)]}{\cos(\varphi_k/2)}, \quad (4.24)$$

Однак для визначення площі поверхні на якій розміщені канавки потрібно також враховувати їх взаємне розміщення, а отже і параметр Δ_k , значення якого буде визначатись із залежності

$$\Delta_k = S_0 - A_{k1} - A_{k2} - 2\rho_k + h_{k2} \quad (4.25)$$

З врахуванням виразу (4.24) вираз (4.25) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \Delta_k = S_0 - A_{k1} - \frac{(R_{kc1} + S_0) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) + \operatorname{tg}(\varphi_k/2)} - 2\rho_k + \\ + \frac{\left(R_{kc2} - \frac{(R_{kc1} + S_0) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) + \operatorname{tg}(\varphi_k/2)} \right) \cdot [1 - \cos(\varphi_k/2)]}{\cos(\varphi_k/2)} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Формулу для визначення площі елемента канавки V-подібної форми частково регулярного мікрорельєфу для канавок амплітуду яких знаємо отримано у роботі [123].

$$F_{e11} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot A_{k1}}{\cos(\alpha_{k1}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_k - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1} + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \right] \quad (4.27)$$

де φ_k – кутовий крок канавок ЧРМ, який відповідає одному елементу, град;

α_k – кут елемента канавки, сформованої на ТПТО з радіусом R_{kc} , град;

S_k – коловий крок канавок ЧРМ, мм;

ρ_k – радіус відбитка деформувального елемента ЧРМ (ширина канавки);

A_k – амплітуда руху деформувального елемента, мм.

Слід відмітити, що дана формула має область застосування [123]

$$S_k > \left[\frac{\rho \left[\operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha_k + \varphi_k}{2} \right) + \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha_k}{2} \right) \right]}{2} - \frac{\pi \cdot \rho (180 - \alpha_k - 0,5 \cdot \varphi_k)}{360^\circ} \right] \cdot \left[\sin \left(\frac{\alpha_k}{2} \right) \right]$$

Оскільки величини A_k і α_k взаємозалежні, виразимо їх за допомогою залежності

$$A_{k2} = \frac{S_{k2}}{4 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)} \quad (4.28)$$

У формулі (4.28) усі параметри невідомі і взаємозалежні один від одного. Зведемо їх до мінімуму.

Для цього записано значення S_{k2} виразивши його як

$$S_{k2} = 2R_{k2} \sin(\varphi_k/2) \quad (4.29)$$

Для визначення значення R_{k2} записано систему рівнянь

$$\begin{cases} R_{kc2} = R_{k2} + A_{k2} - h_{k2} \\ R_{kc2} = R_{kc1} + S_o \end{cases} \quad (4.30)$$

де S_o – осьовий крок канавок, мм/об.

З системи (4.28) визначимо R_{k2} використавши формулу (4.24)

$$R_{k2} = \frac{R_{kc1} + S_o - A_{k2}}{\cos(\varphi_k/2)} \quad (4.31)$$

Записано значення A_{k2} використавши формулу (4.29) і (4.31)

$$A_{k2} = \frac{2(R_{kc1} + S_o - A_{k2}) \sin(\varphi_k/2)}{4 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) \cdot \cos(\varphi_k/2)} \quad (4.32)$$

Спростивши і зробивши відповідні перетворення отримаємо

$$A_{k2} = \frac{(R_{kc1} + S_o) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2 \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) + \operatorname{tg}(\varphi_k/2)} \quad (4.33)$$

Тоді формулу (4.27) для канавки, амплітуда якої невідома записано у вигляді:

$$F_{ел2} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot (R_{kc1} + S_o) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{[2 \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - \operatorname{tg}(\varphi_k/2)] \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k2} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} -$$

$$- \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \right]$$

Для забезпечення однакової відносної площі РМР прирівняємо значення отримані у формулі (4.21) для канавок розміщеній відстані від центра обертання торцевої поверхні.

$$\frac{F_{ел1} \cdot n_{ел1}}{\pi \cdot (R_{k1max}'^2 - R_{k1min}'^2)} = \frac{F_{ел2} \cdot n_{ел2}}{\pi \cdot (R_{k2max}'^2 - R_{k2min}'^2)} \quad (4.34)$$

Враховуючи те, що кількість елементів ЧРМ на будь-якому радіусі буде однаковою $n_{ел} = \text{const}$ вираз (4.20) записано у вигляді.

Записано вираз (4.34) з врахуванням залежностей (4.24) і (4.25)

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{8 \cdot \rho_k \cdot A_{k1}}{\cos(\alpha_{k1}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k1} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1} + \varphi_{k1}}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \right] \right] \cdot n_{el} = \\
& \frac{\pi \cdot (R_{k1max}'^2 - R_{k1min}'^2)}{\pi \cdot (R_{k2max}'^2 - R_{k2min}'^2)} = \\
& \left[\frac{8 \cdot \rho_k \cdot (R_{kc1} - S_o) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{[2\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - \operatorname{tg}(\varphi_k/2)] \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k2} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \right] \right] \cdot n_{el}
\end{aligned}$$

(4.35)

Рівняння вирішуємо відносно α_{k2} .

Після скорочень отримаємо

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{8 \cdot A_{k1}}{\cos(\alpha_{k1}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k (180 - \alpha_{k1} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1} + \varphi_{k1}}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \right] \right] \cdot n_{el} = \\
& \frac{\pi \cdot (R_{k1max}'^2 - R_{k1min}'^2)}{\pi \cdot (R_{k2max}'^2 - R_{k2min}'^2)} = \\
& \frac{8 \cdot (R_{kc1} - S_o) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{[2\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - \operatorname{tg}(\varphi_k/2)] \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k (180 - \alpha_{k2} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \right]
\end{aligned}$$

(4.36)

Отримали рівняння з однією невідомою α_{k2} . Точний розв'язок рівняння (4.36) отримати неможливо, оскільки воно після спрощення містить невідому як у вигляді окремих доданків, так і під знаками тригонометричних функцій. Тому було використано чисельні методи. Для знаходження α_{k2} ввели функцію $f(\alpha_{k2})$ у вигляді

$$f(\alpha_{k2}) = f_1(\alpha_{k2}) - f_2(\alpha_{k2}) , \quad (4.37)$$

де $f_1(\alpha_{k2})$ та $f_2(\alpha_{k2})$ – ліва та права частини формули (4.36) відповідно.

Тоді α_{k2} є розв'язком рівняння

$$f(\alpha_{k2}) = 0 . \quad (4.38)$$

Для розв'язування рівняння (4.38) використали метод половинного поділу відрізка. Для досягнення потрібної точності обчислення проводили з використанням системи комп'ютерної алгебри Mathcad.

Отримавши значення α_{k2} із наперед заданою точністю, за формулою (4.38) визначали A_{k2} .

Після отримання значення A_{k2} розраховуємо значення відносної площі віброобкочування за формулою (4.21). Це значення повинно бути однаковим для канавок розташованих на різній відстані від центра обертання ТПТО.

Для визначення параметрів канавок розташованих на відстані $R_{kci+1} = R_{kci} + S_o$ використовуємо формулу (4.21) записану у вигляді

$$\left[\frac{8 \cdot \rho_k \cdot (R_{kci} - S_o) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{[2\operatorname{tg}(\alpha_{ki+1}/2) - \operatorname{tg}(\varphi_k/2)] \cdot \cos(\alpha_{ki}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{ki+1} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{ki+1} + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{ki+1}}{2}\right) \right] \right] \cdot n_{el} = F_{ni} \cdot \pi \cdot (R_{ki+1max}^2 - R_{ki+1min}^2) \quad (4.39)$$

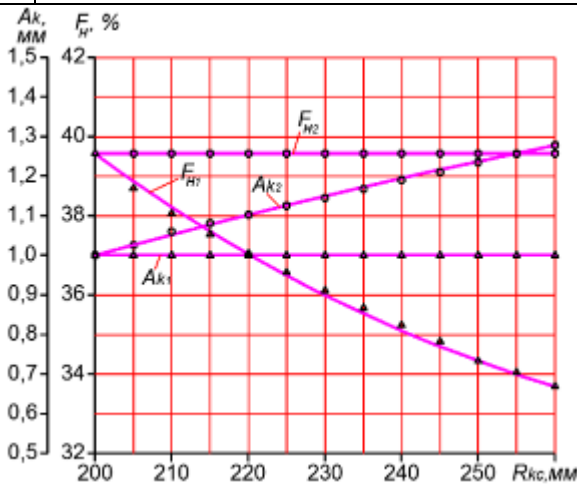
Отримали рівняння з однією невідомою α_{k3} , значення якого знаходимо аналогічно значенню α_{k2} за допомогою методу половинного поділу відрізка використовуючи систему комп'ютерної алгебри Mathcad.

Для прикладу покажемо зміну відносної площі віброобкочування як для випадку коли $A_{k2} = \text{const}$ так для випадку, коли значення A_{k2} визначали із залежностей (4.36) і (4.38). Для цього вихідні параметри встановимо наступними Діапазон значень $R_{kc} = 200 \dots 260$ мм з кроком $S_o = 5$ мм/об, $A_{k1} = 1$ мм, $n_{el} = 800$ ел. на проміжку $\varphi = [0..2\pi]$, $\rho_k = 0.5$ мм. Результати розрахунку зведено у таблиці 4.3. Точність розрахунків встановлено на рівні 0,0001.

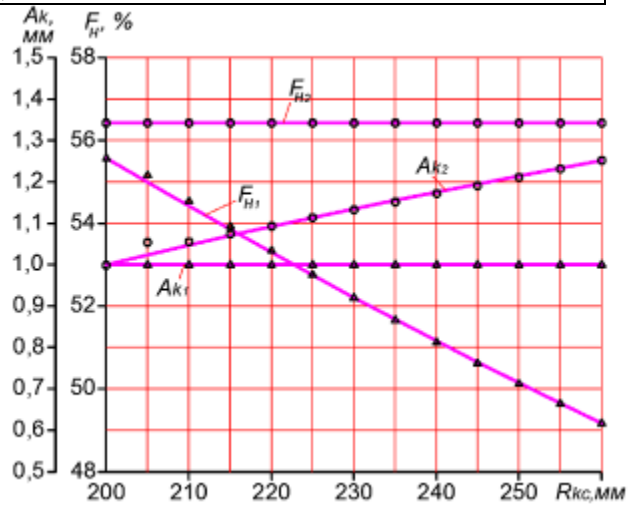
Таблиця 4.3 – Значення параметрів процесу віброобкочування ЧРМ на торцевих поверхнях тіл обертання

Параметр	Значення параметра												
R_{kc} , мм	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250	255	260
при $\rho_k=0,5$ мм													
без коректування амплітуди $A_k=1$ мм													
F_n , %	39,58	38,70	38,06	37,54	37,05	36,57	36,11	35,67	35,24	34,83	34,43	34,05	33,69
з коректуванням амплітуди													
A_k , мм	1	1.054	1.060	1.081	1.103	1.125	1.146	1.168	1.190	1.210	1.234	1.256	1.278
F_n , %	39,58												
при $\rho_k=0,75$ мм													
без коректування амплітуди $A_k=1$ мм													
F_n , %	55,80	55,16	54,54	53,93	53,34	52,76	52,20	51,66	51,13	50,62	50,12	49,64	49,17
з коректуванням амплітуди													
A_k , мм	1	1.035	1.056	1.075	1.094	1.114	1.133	1.153	1.173	1.192	1.212	1.232	1.252
F_n , %	56,42												
при $\rho_k=1$ мм													
без коректування амплітуди при $A_k=1$ мм													
F_n , %	70,49	69,90	69,32	68,73	68,14	67,56	67,00	66,42	66,35	65,86	64,78	64,26	63,74
з коректуванням амплітуди													
A_k , мм	1	1.037	1.052	1.068	1.084	1.100	1.117	1.134	1.151	1.168	1.185	1.203	1.220
F_n , %	71,30												

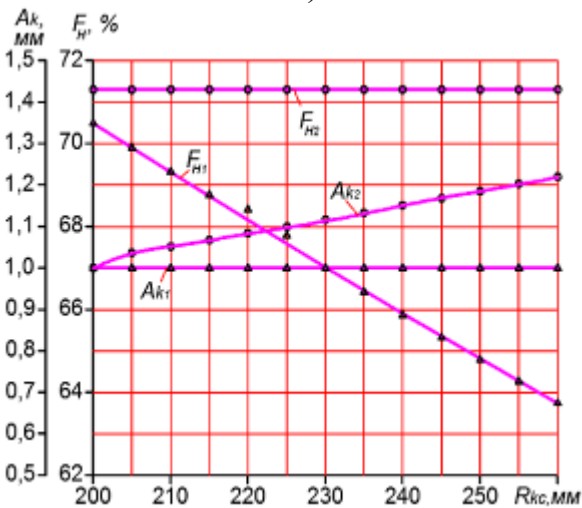
при $\rho_k=1,25$ мм													
без коректування амплітуди при $A_k=1$ мм													
$F_n, \%$	83,22	82,82	82,39	81,93	81,46	80,97	80,47	79,96	79,94	78,45	78,44	77,91	77,41
з коректуванням амплітуди													
A_k , мм	1	1.017	1.048	1.059	1.072	1.084	1.097	1.110	1.124	1.138	1.152	1.167	1.182
$F_n, \%$	84,31												



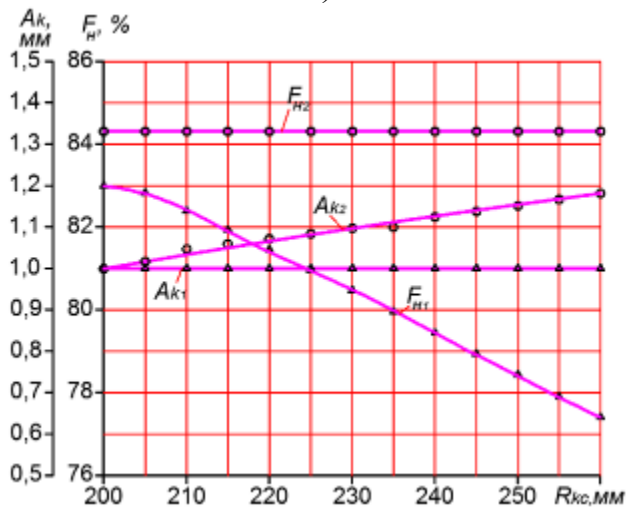
а)



б)



в)



г)

а) $\rho_k=0,5$ мм; б) $\rho_k=0,75$ мм; в) $\rho_k=1,0$ мм; г) $\rho_k=1,25$ мм

Рисунок 4.10 – Залежність відносної площі віброобробчування F_n від амплітуди коливань A_k на різній відстані від центра обертання ТПО при

Отримані графічні залежності (рис. 4.10) показують однаковий характер зміни відносної площі віброобкочування F_n від амплітуди коливань A_k на різній відстані від центра обертання ТПТО при різних значеннях параметра ρ_k .

Встановлено, що постійне значення амплітуди коливань призводить до зміни відносної площі віброобкочування на 5,81-6,6% від початкового значення на проміжку $R_{kc}=200-260$ мм. Однак при $\rho_k=0,5$ мм зміна відносної площі становить 14,9% від початкового значення $F_n=39,58\%$, що призведе до виходу за межі оптимальних значень відносної площі мікрорельєфу та зміни експлуатаційних властивостей поверхні.

З цього можна зробити висновок, що параметр ρ_k – радіус відбитка канавки, чинить суттєвий вплив на зміну відносної площі віброобкочування навіть за малого діапазону значень параметра R_{kc} .

Отримані залежності дозволять формувати частково-регулярні мікрорельєфи з канавками V-подібної форми на торцевих поверхнях тіл обертання із забезпеченням однакової відносної площі мікрорельєфу, що в свою чергу забезпечить однакові фізико-механічні властивості в будь-якій частині поверхні.

4.5 Визначення оптимальних параметрів канавок частково регулярного мікрорельєфу II типу сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання

Умовою забезпечення однакових фізико-механічних властивостей ТПТО є забезпечення стабільної величини відносної площі ЧРМ у будь-якій її частині. Цю площу згідно [109] визначають за формулами (4.18)

Оскільки II вид ЧРМ передбачає дотикання канавок із зміщенням осьових ліній симетрії канавок на кутового кроку $\gamma_\delta = 0,5 \cdot \varphi_k$ [16] (рис. 4.11).

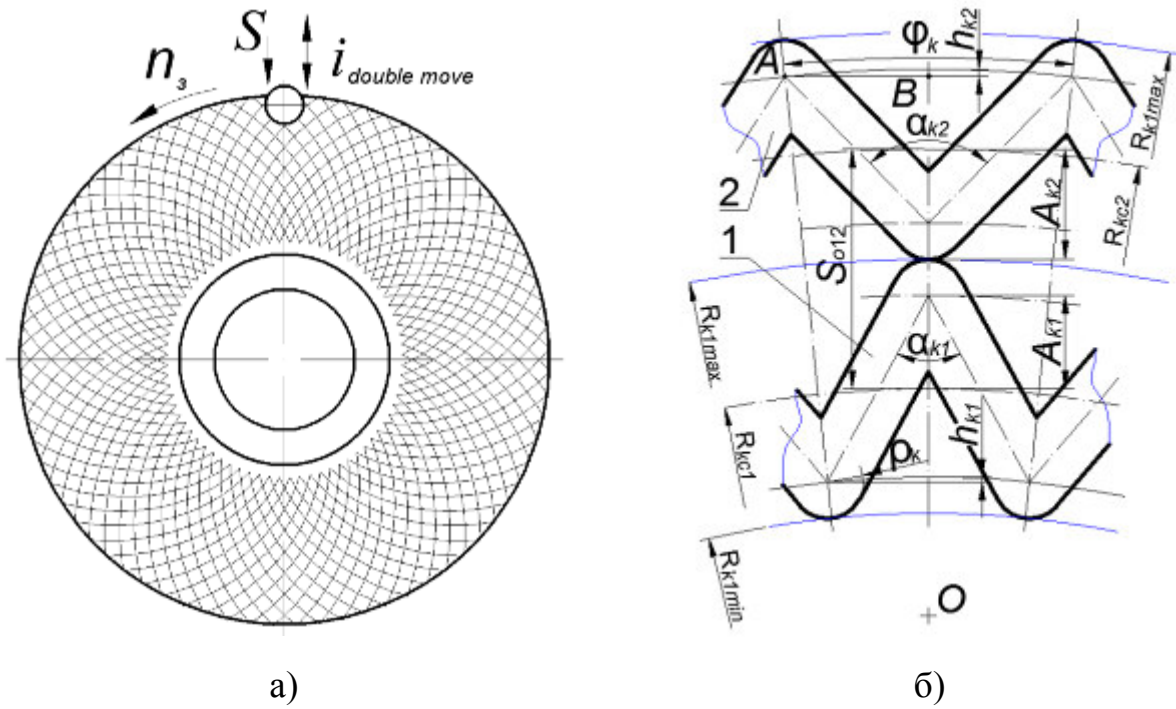


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд (а) та схема (б) для визначення параметрів частково регулярного мікрорельєфу II виду із канавками V-подібної форми зміщеними на 0,5 кутового кроку, сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання

Для забезпечення стабільної величини відносної площі ЧРМ II виду, а саме взаємного контакту канавок необхідно одночасно здійснювати коригування амплітуди коливань деформувального елемента A_k з осьовим кроком канавок S_{o12} .

Оскільки канавки торкаються вершинами, то має місце залежність $R_{k1max}=R_{k2min}$.

Запишемо залежність для визначення габаритних параметрів канавки 1

$$\begin{aligned}
 R_{k1max} &= R_{kc1} + A_{k1} + \rho_k \\
 R_{k1min} &= R_{kc1} - A_{k1} - \rho_k + h_{k1}
 \end{aligned}
 \tag{4.40}$$

Для канавки 2, розміщеної далі від центру обертання ТПО з урахуванням того, що $R_{kc2} = R_{kc1} + S_{o12}$ формули для визначення габаритних

параметрів канавки набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} R_{k2\max} &= R_{kc1} + S_{ol2} + A_{k2} + \rho_k + h_{k2} \\ R_{k2\min} &= R_{kc1} + S_{ol2} - A_{k2} - \rho_k \end{aligned} \quad (4.41)$$

де h_{ki} – висота хорди кола відповідного радіусу, мм;

Висоту хорди h_{k1} канавки 1 знаходимо із залежності $h_{k1} = R_{k1} [1 - \cos(\phi_k/2)]$ та з урахуванням, що $R_{k1} = R_{kc1} - A_{k1} + h_{k1}$.

$$h_{k1} = \frac{(R_{kc1} - A_{k1}) [1 - \cos(\phi_k/2)]}{\cos(\phi_k/2)} \quad (4.42)$$

З урахуванням (4.42) формула (4.40) після скорочення набуде вигляду

$$R_{k1\min} = R_{kc1} - A_{k1} - \rho_k + \frac{(R_{kc1} - A_{k1}) [1 - \cos(\phi_k/2)]}{\cos(\phi_k/2)} \quad (4.43)$$

Висоту хорди h_{k2} канавки 2 знаходимо із залежності

$$h_{k2} = OA - OB, \quad (4.44)$$

$$OA = \frac{R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot A_{k2} + 2 \cdot \rho_k}{\cos(\phi_k/2)}, \quad (4.45)$$

$$OB = R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot A_{k2} + 2 \cdot \rho_k. \quad (4.46)$$

Отже з врахуванням рівнянь (4.45) і (4.46) формула для визначення параметра h_{k2} набуде вигляду

$$h_{k2} = (R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot A_{k2} + 2 \cdot \rho_k) \cdot \left[\frac{1}{\cos(\alpha_{k2}/2)} - 1 \right] \quad (4.47)$$

Формулу для визначення значення осевого кроку запишемо у вигляді:

$$S_{o12} = A_{k1} + A_{k2} + 2 \cdot \rho_k \quad (4.48)$$

Формулу для визначення амплітуди коливань A_{k2} в залежності від параметрів канавки 1 отримаємо розв'язавши систему рівнянь

$$\begin{cases} (R_{kc1} - A_{k1}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2) = 2 \cdot A_{k1} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2) \\ (R_{kc1} + S_{o12} - A_{k2}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2) = 2 \cdot A_{k2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) \end{cases} \quad (4.49)$$

Розв'язавши систему відносно A_{k2} отримаємо

$$A_{k2} = \frac{(R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot \rho_k) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - 2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)} \quad (4.50)$$

Система рівнянь (4.40) з урахуванням (4.47), (4.48) і (4.50) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} R_{k2\max} = & R_{kc1} + A_{k1} + \frac{(R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot \rho_k) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - \operatorname{tg}(\varphi_k/2)} + 3 \cdot \rho_k + \\ & + \left(R_{kc1} + A_{k1} + \frac{(R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot \rho_k) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - \operatorname{tg}(\varphi_k/2)} + 2 \cdot \rho_k \right) \cdot \left[\frac{1}{\cos(\alpha_{k2}/2)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (4.51)$$

$$R_{k2\min} = R_{kc1} + A_{k1} + \rho_k$$

Умову формування ЧРМ, що сформований на торцевих поверхнях тіл

обертання із забезпеченням однакової відносної площі для канавок з різною амплітудою подано у вигляді

$$\frac{F_{el1} \cdot n_{el}}{\pi \cdot (R_{k1max}^2 - R_{k1min}^2)} = \frac{F_{el2} \cdot n_{el}}{\pi \cdot (R_{k2max}^2 - R_{k2min}^2)}, \quad (4.52)$$

де F_{el1} – площа елемента канавки 1 (рис.1), мм²;

F_{el2} – площа елемента канавки 2, мм²;

Площу елемента канавки ЧРМ визначено за формулою (4.14), яку для i -ї канавки записано у вигляді

$$F_{el.i} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot A_{k1}}{\cos(\alpha_{k1}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k1} - 0,5 \cdot \varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[ctg \left(\frac{\alpha_{k1} + \varphi_k}{2} \right) + ctg \left(\frac{\alpha_{k1}}{2} \right) \right], \quad (4.53)$$

Для елементів канавки 2 вираз (4.53) з урахуванням (4.50) записано у вигляді

$$F_{el.2} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot (R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot \rho_k) \cdot tg(\varphi_k/2)}{2 \cdot \cos(\alpha_{k2}/2) [tg(\alpha_{k2}/2) - tg(\varphi_k/2)]} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k2} - 0,5 \varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[ctg \left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2} \right) + ctg \left(\frac{\alpha_{k2}}{2} \right) \right] \quad (4.54)$$

Залежність (4.52) з урахуванням формул (4.53) і (4.54) записано у вигляді

$$\frac{\left(\frac{8 \cdot \rho_k \cdot A_{k1}}{\cos(\alpha_{k1}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k1} - 0,5 \varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[ctg \left(\frac{\alpha_{k1} + \varphi_k}{2} \right) + ctg \left(\frac{\alpha_{k1}}{2} \right) \right] \right)}{(R_{k1max}^2 - R_{k1min}^2)} = \frac{\left(\frac{8 \cdot \rho_k \cdot (R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot \rho_k) \cdot tg(\varphi_k/2)}{2 \cdot \cos(\alpha_{k2}/2) [tg(\alpha_{k2}/2) - tg(\varphi_k/2)]} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k2} - 0,5 \varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[ctg \left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2} \right) + ctg \left(\frac{\alpha_{k2}}{2} \right) \right] \right)}{(R_{k2max}^2 - R_{k2min}^2)} \quad (4.55)$$

Точний розв'язок рівняння (4.55) отримати неможливо, оскільки воно після спрощення містить невідому α_{k2} як у вигляді окремих доданків, так і під знаками тригонометричних функцій. Тому було використано чисельні методи. Для знаходження α_{k2} ввели функцію $f(\alpha_{k2})$ у вигляді

$$f(\alpha_{k2}) = f_1(\alpha_{k2}) - f_2(\alpha_{k2}) , \quad (4.56)$$

де $f_1(\alpha_{k2})$ та $f_2(\alpha_{k2})$ – ліва та права частини формули (4.55) відповідно. Тоді α_{k2} є розв'язком рівняння

$$f(\alpha_{k2}) = 0 . \quad (4.57)$$

Для розв'язування рівняння (4.55) використали метод половинного поділу відрізка. Для досягнення потрібної точності, обчислення проводили з використанням системи комп'ютерної алгебри Mathcad.

Отримавши значення α_{k2} із наперед заданою точністю, за формулою (4.50) визначали A_{k2} .

В таблиці 4.4 наведено результати розрахунку зміни відносної площі віброобробчування від відстані до центра обертання R_{kc} при формуванні частково регулярного мікрорельєфу II виду із канавками зміщеними на 0,5 кутового кроку із постійною амплітудою $A_k = 1$ мм. та параметрами $N_{el} = 240$ шт., $\rho_k = 0,25$ мм. і $\rho_k = 0,5$ мм.

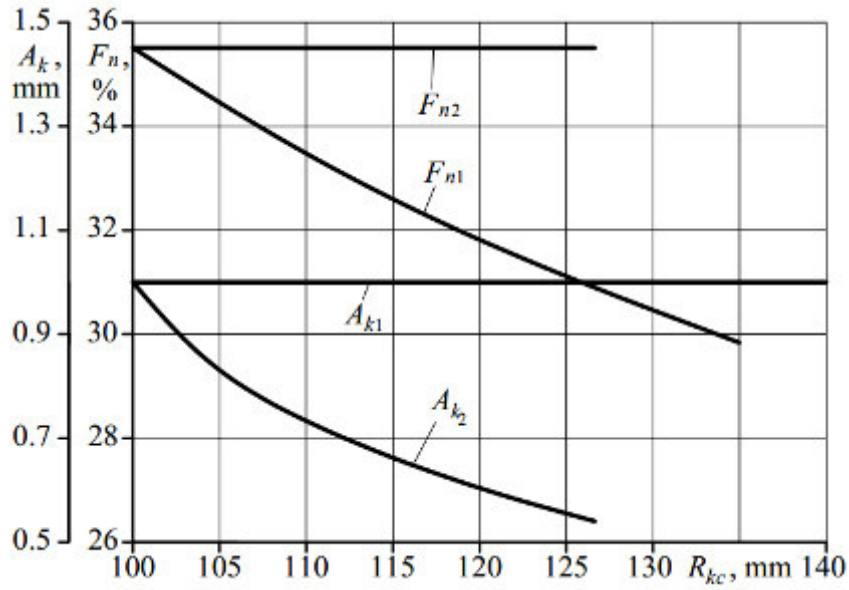
В таблиці 4.5 наведено результати розрахунку необхідної зміни амплітуди коливань канавок частково регулярного мікрорельєфу II виду для забезпечення стабільної площі віброобробчування на різній відстані до центра обертання R_{kc} для параметрів $N_{el} = 240$ шт., $\rho_k = 0,25$ мм. і $\rho_k = 0,5$ мм.

Таблиця 4.4 – Залежність відносної площі віброобкочування від відстані до центра обертання R_{kc} при формуванні ЧРМ із постійною амплітудою

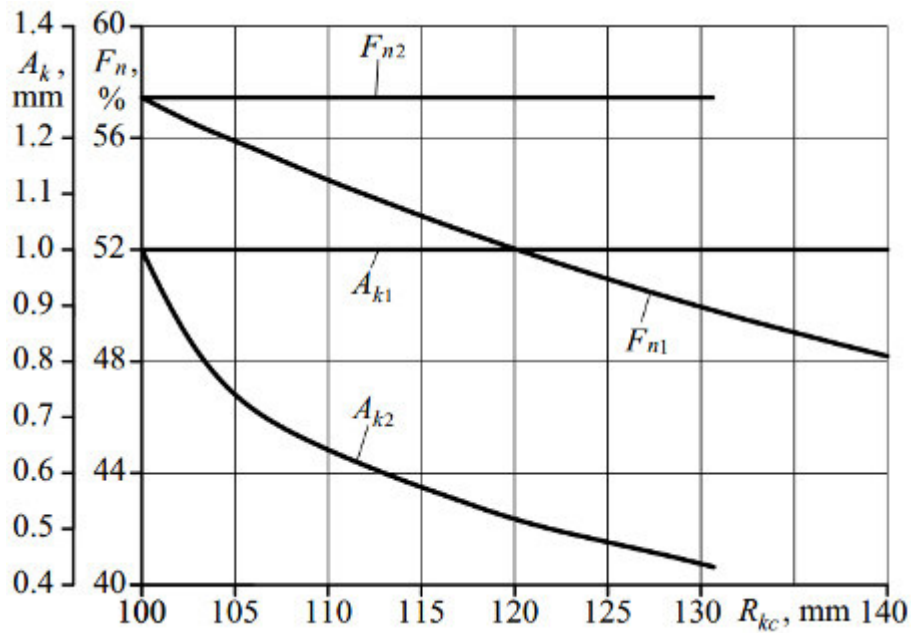
R_{kc} , мм	100	102.5	105	107.5	110	112.5	115	117.5	120	122.5	125	127.5	130	132.5	135
при $\rho_k=0,25$ мм, $N_{el}=240$, $A_k=1$ мм.															
F_H , %	35.51	34.96	34.45	33.95	33.48	33.04	32.61	32.21	31.82	31.45	31.10	30.77	30.45	30.14	29.84
при $\rho_k=0.5$ мм, $N_{el}=240$, $A_k=1$ мм															
R_{kc} , мм	100	103	106	109	112	115	118	121	124	127	130	133	136	139	142
F_H , %	57.45	56.51	55.62	54.77	53.97	53.21	52.49	51.81	51.16	50.54	49.95	49.39	48.86	48.35	47.87

Таблиця 4.5 – Залежність відносної площі віброобкочування від відстані до центра обертання R_{kc} при формуванні ЧРМ із змінною амплітудою

R_{kc} , мм	100	102.41	104.66	106.81	108.87	110.86	112.79	114.66	116.49	118.28	120.03	121.74	123.41	125.05	126.66
при $\rho_k=0.25$ мм, $N_{el}=240$															
A_k , мм	1.0	0.91	0.84	0.79	0.76	0.72	0.7	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59	0.57	0.56	0.54
F_H , %	35,51														
при $\rho_k=0.5$ мм, $N_{el}=240$															
R_{kc} , мм	100	102.82	105.37	107.80	110.12	112.38	114.57	116.72	118.82	120.87	122.89	124.88	126.83	128.75	130.64
A_k , мм	1,0	0.82	0.73	0.68	0.64	0.61	0.58	0.56	0.53	0.52	0.50	0.48	0.46	0.45	0.43
F_H , %	57,45														



а)



б)

а) $\rho_k=0,25\text{мм}$; б) $\rho_k=0,5\text{мм}$

Рисунок 4.12 – Залежність відносної площі віброобробчування F_n від амплітуди коливань A_k на різній відстані від центра обертання ТПТО при

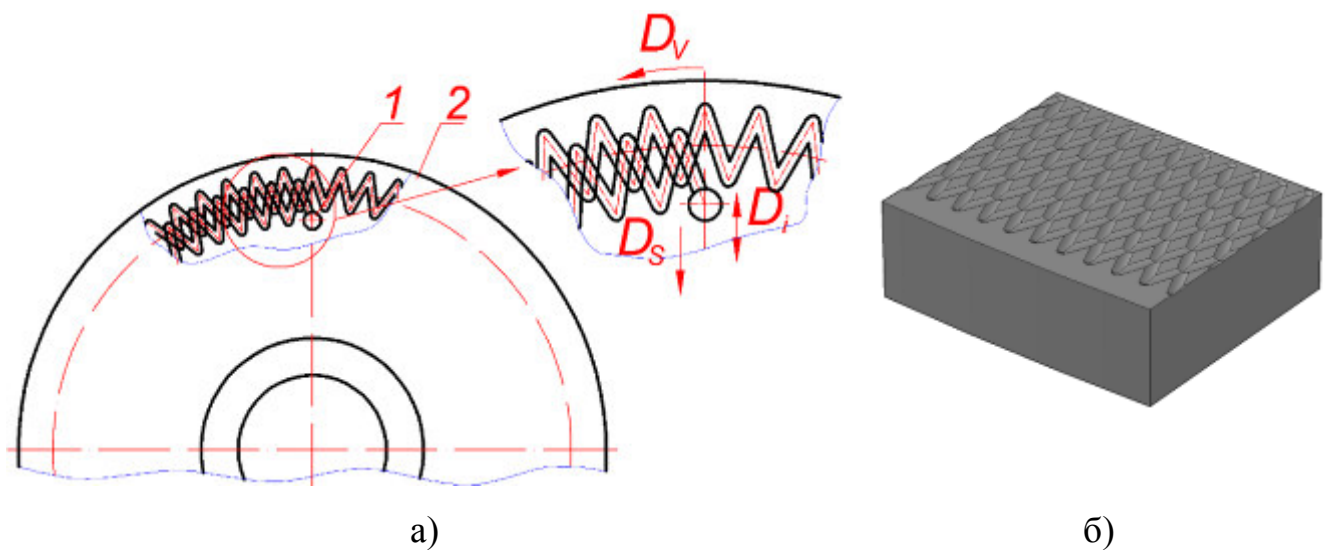
З наведених графіків видн, що при формуванні ЧРМ на ділянках незначної ширини (менше 30 мм) амплітуду коливань можна приймати постійною, оскільки відносна площа віброобробчування при цьому зміниться

менше ніж на 10 %. На поверхнях із значною площею віброобробчування доцільно здійснювати коригування амплітуди коливань для забезпечення стабільної величини відносної площі мікрорельєфу.

4.6 Визначення оптимальних параметрів регулярного мікрорельєфу сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання

Метою даного розділу є визначення площі перекриття канавок ЧРМ сформованого на ТПТО та визначення на неї впливу взаємного розміщення та геометричних параметрів канавок.

Технологічну схему формування частково регулярного мікрорельєфу III виду з канавками V-подібної форми на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» із формувальними рухами наведено на рис. 4.13.



- а) схема формування із формувальними рухами; б) візуальне зображення
 1 – деформувальний елемент; 2 – торцева поверхня диска
 D_v – обертовий рух диска; D_s – рух подачі інструменту;
 D_i – осциляційний зворотно-поступальний рух інструменту

Рисунок 4.13 – Частково регулярний мікрорельєф сформований на диску:

У відповідності до класифікації [126], взаємне розміщення канавок, розміщення осьових ліній симетрії канавок та форма канавок є ознаками

класифікації канавок ЧРМ, що сформовані на ТПТО.

Площа перекриття S_{ov} – параметр регулярного мікрорельєфу, який характеризує взаємне розміщення канавок мікрорельєфу, які перетинаються.

З іншого боку площа перекриття – це площа відбитків поверхонь канавок, яка є спільною для канавок, зміщених на осьовий крок.

Розглянемо загальний випадок перетину V-подібних канавок, що сформовані на торцевих поверхнях тіл обертання (рис. 4.14). Це допоможе встановити залежні геометричні параметри канавок та взаємозв'язок між ними.

Залежності між параметрами канавок наступні:

Кутовий крок канавки визначається із залежності (4.5) і записано у вигляді:

$$\varphi_k = \frac{360^\circ}{N_{el}}. \quad (4.58)$$

де N_{el} – кількість елементів ЧРМ розташованих на ТПТО в діапазоні 360° .

Записано рівняння для визначення кута α_{k1}

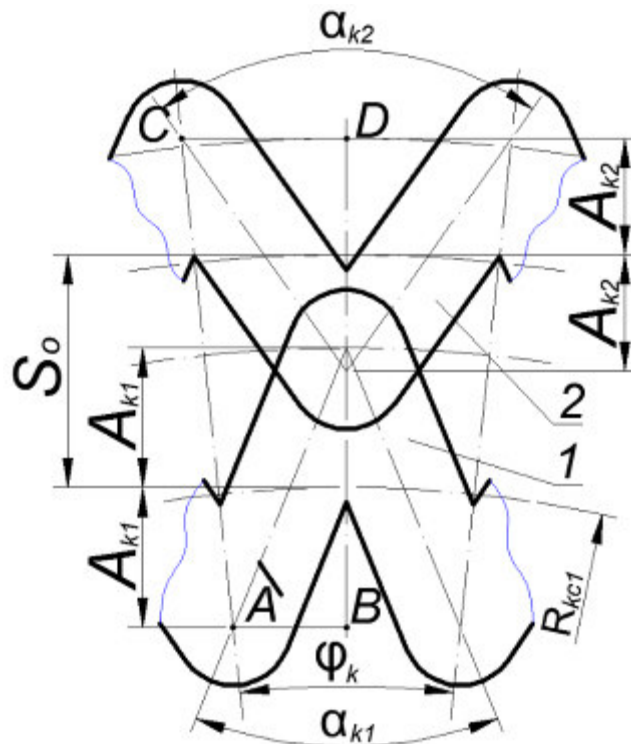
$$\begin{cases} AB = (R_{kc1} - A_{k1}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2) \\ AB = 2 \cdot A_{k1} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2) \end{cases} \quad (4.59)$$

Розв'язавши систему відносно α_{k1} отримаємо:

$$\alpha_{k1} = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{(R_{kc1} - A_{k1}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2 \cdot A_{k1}} \right] \quad (4.60)$$

Аналогічно записано рівняння для визначення кута α_{k2}

$$\begin{cases} CD = (R_{kc1} + S_o + A_{k2}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2) \\ CD = 2 \cdot A_{k2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) \end{cases} \quad (4.61)$$



A_{k1} – амплітуда канавки 1, мм; A_{k2} – амплітуда канавки 2, мм; S_o – осьовий крок канавок, мм; α_{k1} – кут елемента канавки 1, сформованої на ТПТО з радіусом R_{kc1} , град; α_{k2} – кут елемента канавки 2, сформованої на ТПТО з радіусом R_{kc2} , град; φ_k – кутовий крок канавок ЧРМ, град; ρ_k – радіус відбитка деформувального елемента ЧРМ (ширина канавки)

Рисунок 4.14 – Загальний випадок перетинання канавок ЧРМ сформованих на ТПТО

Розв’язавши систему відносно α_{k2} отримаємо:

$$\alpha_{k2} = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{(R_{kc1} + S_o + A_{k2}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2 \cdot A_{k2}} \right] \quad (4.62)$$

Також можна виразити кут α_{k2} через кут α_{k1} . Для цього складемо систему

рівнянь із систем (4.59) і (4.60).

$$\begin{cases} 2 \cdot A_{k1} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2) = (R_{kc1} - A_{k1}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2) \\ 2 \cdot A_{k2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) = (R_{kc1} + S_o + A_{k2}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2) \end{cases} \quad (4.63)$$

Розв'язавши цю систему рівнянь відносно α_{k2} отримаємо

$$\alpha_{k2} = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{0,5 \cdot (A_{k1} + A_{k2} + S_o) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2) + A_{k1} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2)}{A_{k2}} \right] \quad (4.64)$$

Таким чином отримані залежності дозволять виражати необхідні геометричні параметри через відомі величини.

При аналізі процесу перетинання канавок, встановлено, що існує сім стадій їх перетинання, з трансформацією ступеня перекриття від такого, що перетинаються сегментними частинами вершин до такого, що повністю перетинаються прямолінійними ділянками канавок.

Аналітичні залежності для визначення площі перекриття на кожній окремій стадії будуть різними, тому розглянемо кожен випадок окремо.

Слід також зазначити, що площу перекриття канавок для випадків I–IV визначали як площу складної фігури утвореної сегментами та трапеціями. Кількість таких площ буде рівною половині кількості канавок, які перетинаються.

Для випадків V – VII площу перекриття визначали як площу ромбів, які перетинаються. Кількість таких площ буде рівною кількості канавок, які перетинаються.

Стадія I. Розглянемо випадок коли канавки перетинаються вершинами в межах колового сегмента радіусом ρ_k і висотою хорди Δ_ρ (рис.4.15).

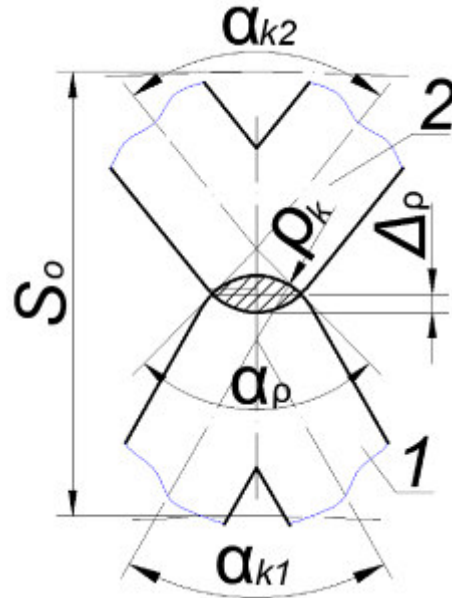


Рисунок 4.15 – Схема перекриття V-подібних канавок ЧРМР (стадія І)

Площа перекриття двох канавок визначається як сума площ їх сегментів із висотою хорди Δ_ρ .

$$S_{ov} = \rho_k^2 \cdot \left[\frac{\pi \cdot \alpha_p}{180^\circ} - \sin \alpha_p \right]. \quad (4.65)$$

Висота хорди визначається за формулою:

$$\Delta_\rho = \frac{2 \cdot \rho_k - S_o + A_{k1} + A_{k2}}{2}, \quad (4.66)$$

де ρ_k – радіус сегмента, мм;

S_o – осьовий крок канавок ЧРМ, мм;

A_k – амплітуда канавок ЧРМ, мм.

Кут α_p знаходимо за формулою:

$$\alpha_p = 2 \cdot \arccos \left(\frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2 \cdot \rho_k} \right). \quad (4.67)$$

З врахуванням (4.67) формула (4.65) набуде вигляду

$$S_{ov} = \rho_k^2 \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot \arccos\left(\frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2 \cdot \rho_k}\right)}{180^\circ} - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2 \cdot \rho_k}\right)\right) \right] \quad (4.68)$$

Область існування для даної формули визначається граничним значенням осьового кроку ЧРМ, яке визначається із залежності

$$\begin{cases} A_{k1} + A_{k2} + 2 \cdot \rho_k > S_o \geq A_{k1} + A_{k2} + 2 \cdot \rho_k \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \\ \alpha_{k2} > \alpha_{k1} \end{cases} \quad (4.69)$$

Стадія II. Розглянемо випадок, коли канавки перетинаються вершинами в межах колового сегмента радіусом ρ_k і висотою хорди Δ_{p1} та частково прямолінійними ділянками (рис.4.16).

Розрахуємо площу перекриття канавок для цього випадку.

Площу перекриття в даному випадку будемо визначати як суму площ двох кругових сегментів радіусом ρ_k і площ двох трапецій $ACDB$ і $AELB$ (рис.4.16).

$$S_{ov} = S_{s1} + S_{s2} + S_{t1} + S_{t2} \quad (4.70)$$

де S_{s1} – площа сегмента канавки 1, мм²;

S_{t1} – площа трапеції канавки 1, мм²;

S_{s2} – площа сегмента канавки 2, мм²;

S_{t2} – площа трапеції канавки 2, мм².

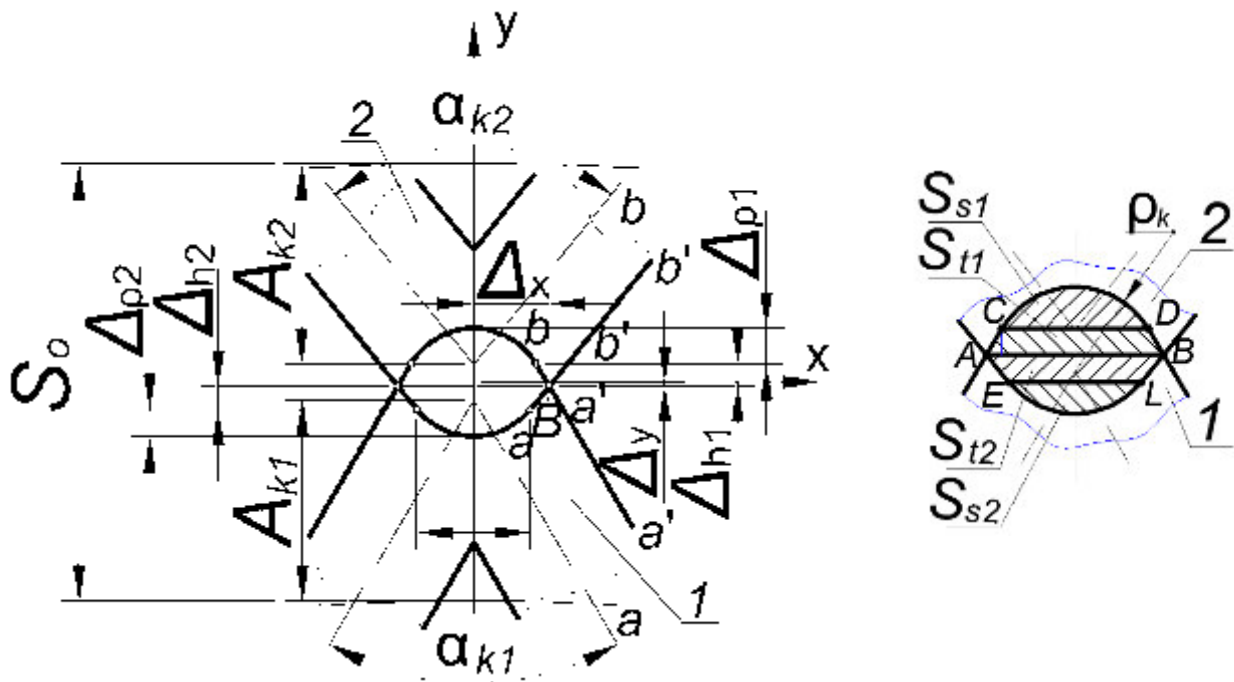


Рисунок 4.16 – Схема перекриття V-подібних канавок ЧРМР (стадія II)

Для визначення площі перекриття за схемою (рис.4.16) доцільно використати спосіб визначення координат точки B перетину елементів канавки.

Для цього запишемо рівняння осьових ліній канавок 1 і 2 в системі координат xu .

Рівняння осьової лінії $a-a$ канавки 1 записано у вигляді

$$y_{i(a-a)} = \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \cdot x_i + \frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2} \quad (4.71)$$

Рівняння осьової лінії $b-b$ канавки 2 записано у вигляді

$$y_{i(b-b)} = -\operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \cdot x_i - \frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2} \quad (4.72)$$

Рівняння сліду бокової поверхні $a'-a'$ канавки 1 записано у вигляді

$$y_{i(a'-a')} = \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \cdot x_i + \frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2} - \frac{\rho_k}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} \quad (4.73)$$

Рівняння сліду бокової поверхні $b'-b'$ канавки 2 записано у вигляді

$$y_{i(b'-b')} = -\operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \cdot x_i - \frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2} + \frac{\rho_k}{\sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.74)$$

Прирівняємо рівняння (4.73) і (4.74), знайшовши таке значення $x_i = \Delta_x$ при якому значення $y_{i(a'-a')}$ і $y_{i(b'-b')}$ будуть однаковими. Тобто знайдемо координату x точки B .

$$\Delta_x = \frac{\rho_k \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} + \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} \right) - (S_o - A_{k1} - A_{k2})}{\operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right) + \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.75)$$

Підставивши отримане значення у формулу (4.73) отримаємо значення Δ_y .

$$\Delta_y = \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \cdot \frac{\rho_k \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} + \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} \right) - (S_o - A_{k1} - A_{k2})}{\operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right) + \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} + \frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2} - \frac{\rho_k}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} \quad (4.76)$$

Площу трапеції $ACDB$ визначимо за формулою

$$S_{t1} = \frac{a_{t1} + b_{t1}}{2} \cdot \Delta_{h1} \quad (4.77)$$

де a_{t1} – довжина нижньої основи трапеції AB , утвореної перетином двох канавок, мм, $a_{t1} = 2 \cdot \Delta_x$

b_{t1} – довжина верхньої основи трапеції CD , утвореної перетином двох канавок, мм; $b_{t1} = 2 \cdot \Delta_x - 2 \cdot \Delta_{h1} \cdot \text{tg}(\alpha_{k1}/2)$

Δ_{h1} – висота трапеції, утвореної перетином двох канавок, мм.

$$\Delta_{h1} = \rho_k \cdot \sin(\alpha_{k1}/2) - \frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2} + \Delta_y \quad (4.78)$$

Формулу (4.77) для визначення площі трапеції $ACDB$ записано у вигляді

$$S_{t1} = [2 \cdot \Delta_x - \Delta_{h1} \cdot \text{tg}(\alpha_{k1}/2)] \cdot \Delta_{h1} \quad (4.79)$$

З врахуванням (4.75) формулу (4.79) записано у вигляді

$$S_{t1} = \left[\frac{2\rho_k \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} + \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} \right) - 2 \cdot (S_o - A_{k1} - A_{k2})}{\text{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right) + \text{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} - \Delta_{h1} \cdot \text{tg}(\alpha_{k1}/2) \right] \cdot \Delta_{h1} \quad (4.80)$$

Аналогічно знаходили площу трапеції $ABLE$

$$\Delta_{h2} = \rho_k \cdot \sin(\alpha_{k2}/2) - \frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2} - \Delta_y \quad (4.81)$$

$$S_{t2} = \left[\frac{2\rho_k \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} + \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} \right) - 2 \cdot (S_o - A_{k1} - A_{k2})}{\operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k2}}{2}\right) + \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} - \Delta_{h2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \right] \cdot \Delta_{h2} \quad (4.82)$$

Площу сегмента із хордою CD знаходили за формулою

$$S_{s1} = \frac{\rho_k^2}{2} \cdot \left[\frac{\pi \cdot (180 - \alpha_1)}{180^\circ} - \sin(180 - \alpha_1) \right] \quad (4.83)$$

Площу сегмента із хордою EL знаходили за формулою

$$S_{s2} = \frac{\rho_k^2}{2} \cdot \left[\frac{\pi \cdot (180 - \alpha_2)}{180^\circ} - \sin(180 - \alpha_2) \right] \quad (4.84)$$

Область існування для формули (4.70) визначається граничним значенням осьового кроку ЧРМ, яке визначається із залежності

$$2 \cdot \rho_k \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) + A_{k1} + A_{k2} > S_o > A_{k1} + A_{k2} + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \quad (4.85)$$

Стадія III. Розглянемо варіант коли канавки, які перетинаються утворюють один сектор на вершині однієї з канавок (рис. 4.17).

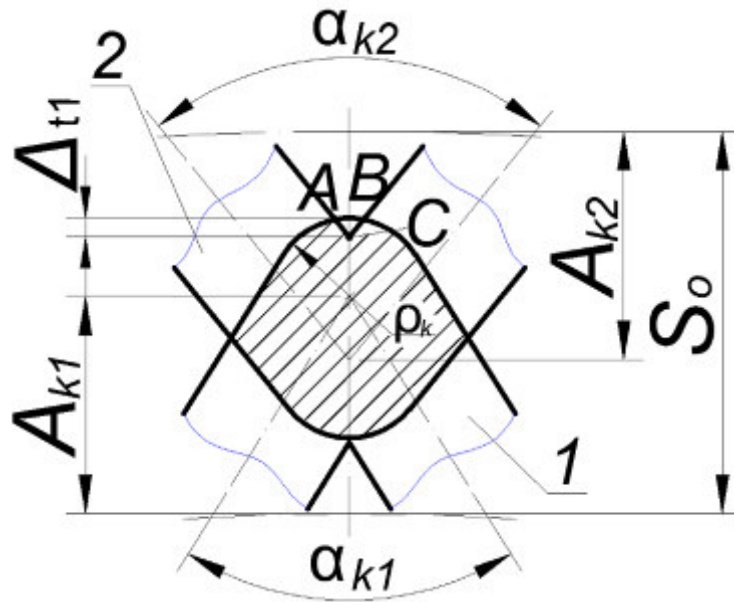


Рисунок 4.17 – Схема перекриття V-подібних канавок ЧРМР (стадія III)

Площу перекриття для цього випадку розраховуємо за формулою (4.70) з врахуванням відсутності площі кругового сектора з радіусом Δ_{t1} , яку визначали за формулою:

$$S_{ov} = S_{s1} + S_{s2} + S_{t1} + S_{t2} - S_{s3} \quad (4.86)$$

де S_{s3} – площа сектора ABC круга, утвореного перетином канавок 1 і 2, мм^2 .

Площу фігур S_{t1} визначають за формулою (4.80), S_{t2} – за формулою (4.82), S_{s1} – за формулою (4.83), S_{s2} – за формулою (4.84).

Площу сектора ABC визначали за формулою:

$$S_{s3} = \frac{\pi \cdot \Delta_{t1}^2 \cdot \alpha_{k2}}{360}, \quad (4.87)$$

де Δ_{t1} – радіус сектора ABC , мм .

Радіус сектора визначали за формулою:

$$\Delta_{r1} = A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \quad (4.88)$$

З врахуванням (4.88) формула (4.87) набуде вигляду

$$S_{s3} = \frac{\pi \cdot \left[A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \right]^2 \cdot \alpha_{k2}}{360} \quad (4.89)$$

Область існування для даної формули визначається граничним значенням осьового кроку ЧРМ, яке визначається із залежності

$$\begin{cases} A_{k1} + A_{k2} + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) > S_o > A_{k1} + A_{k2} + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} \right) \\ \alpha_{k2} > \alpha_{k1} \end{cases} \quad (4.90)$$

Стадія IV. Розглянемо варіант коли канавки, які перетинаються утворюють кругові сектори на вершині кожної канавки (рис. 4.18).

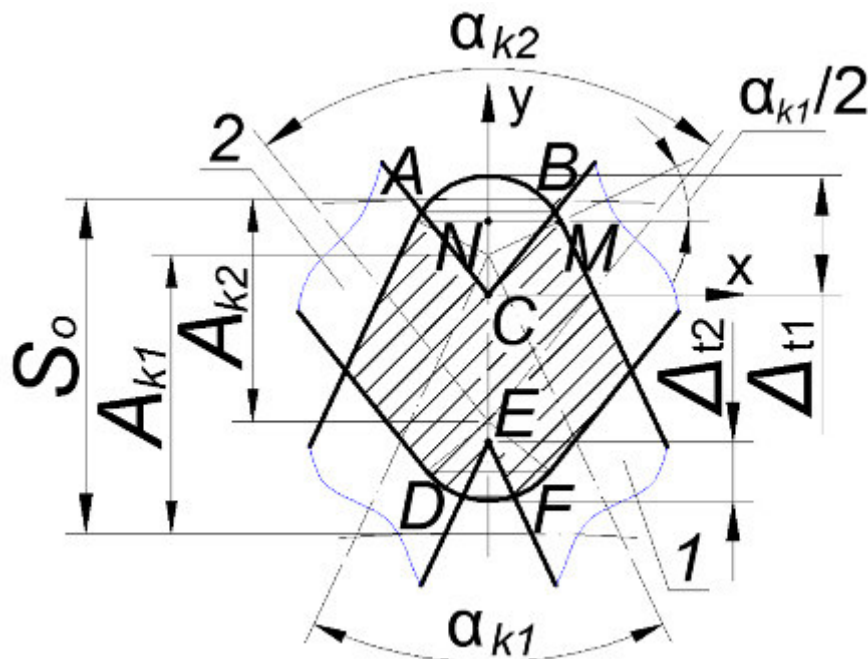


Рисунок 4.18 – Схема перекриття V-подібних канавок ЧРМР (стадія IV)

Площу перекриття для цього випадку розраховали за формулою (4.70) з врахуванням відсутності площ кругових секторів з радіусами Δ_{t1} і Δ_{t2} , яку визначали за формулою:

$$S_{ov} = S_{s1} + S_{s2} + S_{t1} + S_{t2} - S_{s3} - S_{s4} \quad (4.91)$$

де S_{s4} – площа сектора DEF круга, утвореного перетином канавок 1 і 2, мм^2 .

Площу фігур S_{t1} визначають за формулою (4.80), S_{t2} – за формулою (4.82), S_{s1} – за формулою (4.83), S_{s2} – за формулою (4.84), S_{s3} – за формулою (4.89).

Площу сектора DEF визначали за формулою:

$$S_{s4} = \frac{\pi \cdot \Delta_{t2}^2 \cdot \alpha_{k1}}{360^\circ}, \quad (4.92)$$

де Δ_{t2} – радіус сектора DEF , мм .

Радіус сектора визначали за формулою:

$$\Delta_{t2} = A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} \right) \quad (4.93)$$

З врахуванням (4.93) формула (4.92) набуде вигляду

$$S_{s4} = \frac{\pi \cdot \left[A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} \right) \right]^2 \cdot \alpha_{k1}}{360^\circ} \quad (4.94)$$

Область існування для даної формули визначається граничним значенням осьового кроку ЧРМ, яке визначається із залежності

$$\left\{ \begin{array}{l} S_o > A_{k1} + A_{k2} + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} \right) \\ S_o > A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) + \frac{\frac{2 \cdot \rho_k}{\sin[(\alpha_{k1} + \alpha_{k2})/2]} - \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)}{\sin(\alpha_{k1}/2)}}{1 - \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2) + \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)}} \\ \alpha_{k2} > \alpha_{k1} \end{array} \right. \quad (4.95)$$

Стадія V. Розглянемо варіант коли канавки, які перетинаються утворюють два ромби, які перетинаються між собою (рис. 4.19).

Площу перекриття для цього випадку розраховали за формулою (4.70) з врахуванням відсутності площ кругових секторів з радіусами Δ_{t1} і Δ_{t2} , яку визначали за формулою:

$$S_{ov} = S_{s2} + S_{t1} + S_{t2} - S_{BCD} - S_{s4} - 2 \cdot S_{CDE} \quad (4.96)$$

Площу фігур S_{t1} визначають за формулою (4.80), S_{t2} – за формулою (4.82), S_{s2} – за формулою (4.84), S_{s4} – за формулою (4.94).

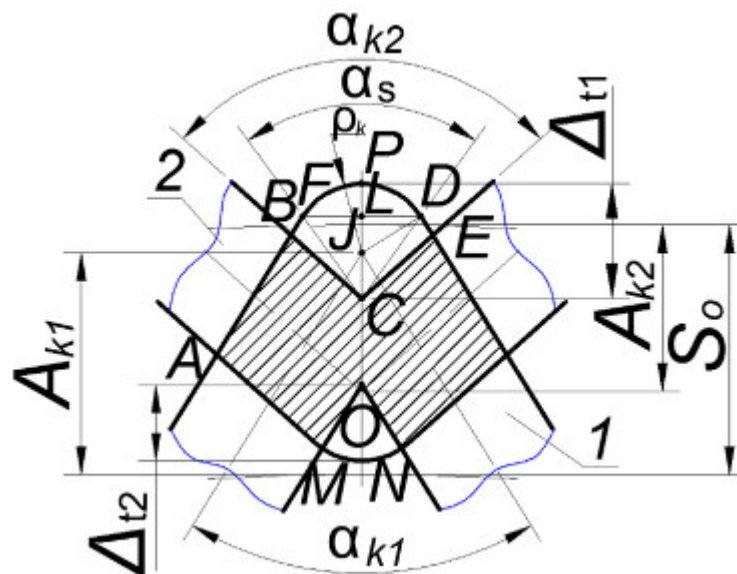


Рисунок 4.19 – Схема перекриття V-подібних канавок ЧРМР (стадія V)

Площу ΔBCD визначали за формулою:

$$S_{BCD} = CL \cdot LD = \left[\Delta_{t1} - \rho_k \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \right) \right] \cdot \rho_k \cdot \cos\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \quad (4.97)$$

З врахуванням формули (4.88) формула (4.96) набуде вигляду

$$S_{BCD} = \left[A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) - \rho_k \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \right) \right] \cdot \rho_k \cdot \cos\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \quad (4.98)$$

Площу ΔCDE визначали за формулою:

$$S_{CDE} = \frac{1}{2} \cdot CD \cdot CE \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k1} - \alpha_s}{2}\right) \quad (4.99)$$

Довжину відрізка CD визначали за формулою

$$CD = \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_s/2)} \quad (4.100)$$

Довжину відрізка CE знайдемо за допомогою теореми синусів.

$$\frac{CD}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} = \frac{CE}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2} - \frac{\alpha_{k2} - \alpha_s}{2}\right)} \quad (4.101)$$

$$CE = \frac{\frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_s/2)} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_s}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.102)$$

Тоді формула (4.99) для визначення площі ΔCDE набуде вигляду

$$S_{CDE} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_s/2)} \cdot \frac{\frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_s/2)} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_s}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k1} - \alpha_s}{2}\right) \quad (4.103)$$

Кут α_s визначається із залежності

$$\alpha_s = 2 \cdot \text{arctg}\left(\frac{LD}{LC}\right) \quad (4.104)$$

$$LD = LC \cdot \text{tg}(\alpha_s/2) \quad (4.105)$$

$$LC = A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)}\right) - \rho_k [1 - \sin(\alpha_{k1}/2)] \quad (4.106)$$

З врахуванням формули (4.105) і (4.106), формула (4.104) набуде вигляду

$$\alpha_s = 2 \cdot \text{arctg}\left(\frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{A_{k1} + A_{k2} - S_o - \frac{\rho_k}{\sin(\alpha_{k2}/2)} + \rho_k \sin(\alpha_{k1}/2)}\right) \quad (4.107)$$

Область існування для даної формули визначається граничним значенням осьового кроку ЧРМ, яке визначається із залежності

$$\left\{ \begin{array}{l} S_o > A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) + \frac{\frac{2 \cdot \rho_k}{\sin[(\alpha_{k1} + \alpha_{k2})/2]} - \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_{k2}/2)}}{1 - \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2) + \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)}} \\ S_o < A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) + \frac{\frac{2 \cdot \rho_k}{\sin[(\alpha_{k1} + \alpha_{k2})/2]} - \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)}{\sin(\alpha_{k1}/2)}}{1 - \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2) + \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)}} \\ \alpha_{k2} > \alpha_{k1} \end{array} \right. \quad (4.108)$$

Стадія VI. Розглянемо варіант коли канавки, які перетинаються утворюють два ромби, які перетинаються між собою (рис. 4.20).

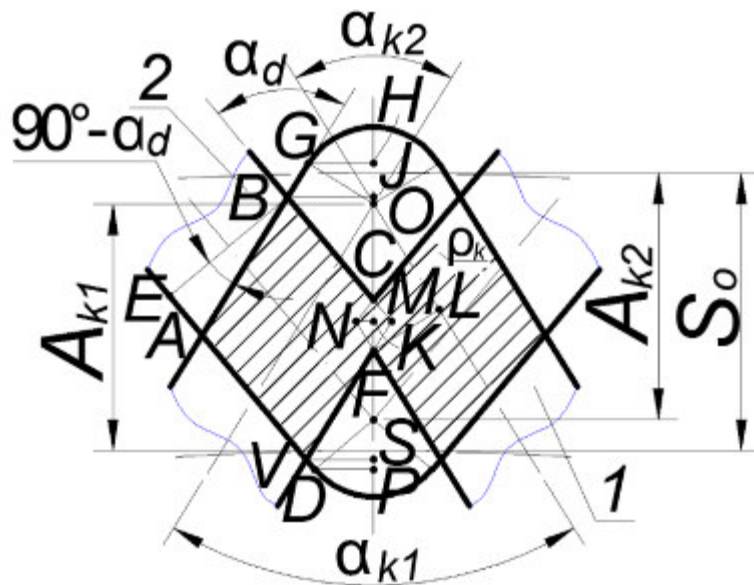


Рисунок 4.20 – Схема перекриття V-подібних канавок ЧРМР (стадія VI)

Площа перекриття канавок 1 і 2 при їх неповному перетинанні розраховується як сума площ ромбів, що утворюються в результаті такого перетину (рис. 4.20) за виключенням площі ромба $NCMF$ за формулою:

$$S_{ov} = 2 \cdot S_R - S_r \quad (4.109)$$

де S_R – площа ромба $ABMD$, мм²;

S_r – площа ромба $FNCM$, мм².

$$S_R = b_d^2 \cdot \sin(\alpha_d) \quad (4.110)$$

де b_d – довжина сторони AB ромба $ABMD$, мм;

α_d – центральний кут ABC ромба $ABMD$, град;

$$\alpha_d = \frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2} \quad (4.111)$$

З трикутника ABE

$$b_d = \frac{2 \cdot \rho_k}{\cos\left(90 - \frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.112)$$

$$S_R = \left[\frac{2 \cdot \rho_k}{\cos\left(90 - \frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \right]^2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right), \quad (4.113)$$

Після скорочень отримаємо

$$S_R = \frac{4 \cdot \rho_k^2}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.114)$$

Площу ромба $NCMF$ визначаємо за формулою:

$$S_r = \frac{CF^2}{ctg\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) + ctg\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.115)$$

$$CF = S_0 - A_{k1} - A_{k2} + \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \quad (4.116)$$

З врахуванням формули (4.116) формула (4.115) набуде вигляду

$$S_r = \frac{\left[S_0 - A_{k1} - A_{k2} + \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \right]^2}{ctg\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) + ctg\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.117)$$

$$S_{ov} = \frac{8 \cdot \rho_k^2}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} - \frac{\left[S_0 - A_{k1} - A_{k2} + \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \right]^2}{ctg\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) + ctg\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.118)$$

Область існування для даної формули визначається граничним значенням осьового кроку ЧРМ, яке визначається із залежності

$$\left\{ \begin{array}{l} S_o > A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \\ S_o < A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) + \frac{\frac{2 \cdot \rho_k}{\sin\left[\frac{(\alpha_{k1} + \alpha_{k2})/2}\right]} - \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_{k2}/2)}}{1 - \frac{tg(\alpha_{k2}/2)}{tg(\alpha_{k1}/2) + tg(\alpha_{k2}/2)}} \\ \alpha_{k2} > \alpha_{k1} \end{array} \right. \quad (4.119)$$

Стадія VII. Розглянемо варіант коли канавки, які перетинаються утворюють два ромби, які не перетинаються між собою (рис. 4.21).

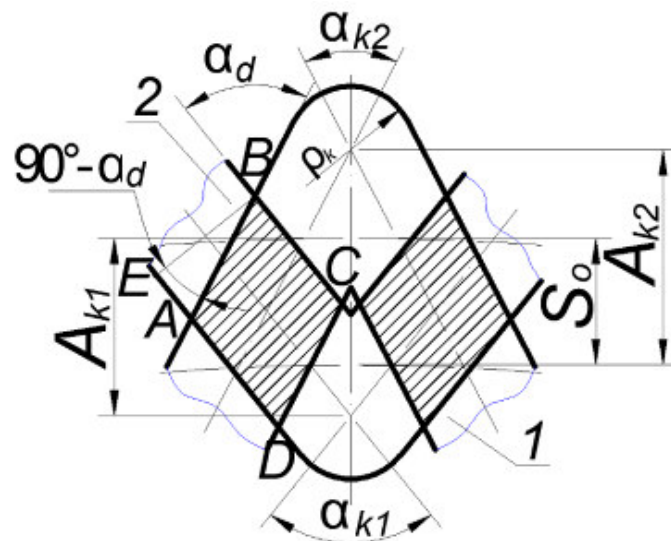


Рисунок 4.21 – Схема перекриття V-подібних канавок ЧРМР (стадія VII)

Площа перекриття канавок 1 і 2 при повному їх перетинанні розраховується як сума площ ромбів, що утворюються в результаті такого перетину (рис. 4.21) за формулою:

$$S_{ov} = 2 \cdot b_d^2 \cdot \sin(\alpha_d) \quad (4.120)$$

де b_d – довжина сторони AB ромба $ABCD$, мм;

α_d – центральний кут ABC ромба $ABCD$, град;

$$\alpha_d = \frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2} \quad (4.121)$$

З трикутника ABE

$$b_d = \frac{2 \cdot \rho_k}{\cos\left(90 - \frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.122)$$

$$S_{ov} = 2 \cdot \left[\frac{2 \cdot \rho_k}{\cos\left(90 - \frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \right]^2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right), \quad (4.123)$$

Після скорочень отримаємо

$$S_{ov} = \frac{8 \cdot \rho_k^2}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \quad (4.124)$$

Область існування для даної формули визначається граничним значенням осьового кроку ЧРМ, яке визначається із залежності

$$S_o < A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right). \quad (4.125)$$

Для забезпечення однакових експлуатаційних властивостей поверхні з частково регулярним мікрорельєфом, сформованим на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання», необхідно розміщувати канавки з таким осьовим кроком, при якому відносна площа віброобробчування мікрорельєфу буде однаковою.

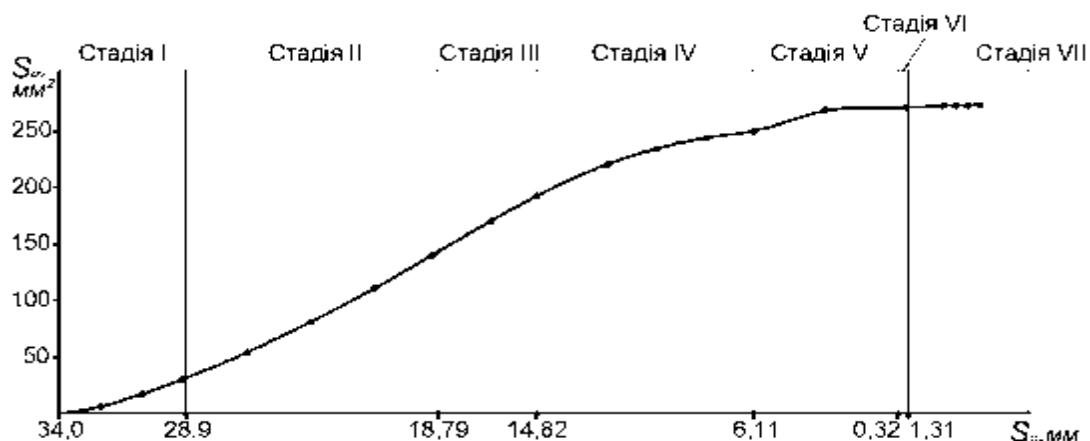


Рисунок 4.22 – Трансформація площі перекриття канавок ЧРМ V-подібної форми частково регулярного мікрорельєфу III виду із зміщенням на 0,5 кутового кроку при $R_{kc1}=200\text{мм}$; $A_{k1}=13\text{мм}$; $A_{k2}=11\text{мм}$; $\rho_k=5\text{мм}$; $\varphi_k=6^\circ$

Отримавши формули для визначення площі перекриття канавок та умови їх існування, можемо розробити алгоритм пошуку оптимального значення осьового кроку S_{opt} (рис. 4.23) канавок. Критерієм оптимізації буде значення відносної площі віброобкочування F_n , яке повинно знаходитись в межах 30-45%.

У дужках на (рис. 4.23) позначено номери формул за якими розраховуються відповідні величини.

На блок-схемі мають місце також наступні позначення:

F_k – площа канавки, сформованої на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання», отримана в роботі [123];

F_{sur} – площа торцевої поверхні, на якій сформовано регулярний мікрорельєф;

F_{rm} – площа канавок регулярного мікрорельєфу з врахуванням площі їх перекриття;

F_n – відносна площа віброобкочування, отримана в роботі [269].

a – дискретна величина зміни кроку осьового кроку S_o (приймається в залежності від технічних можливостей обладнання на якому будуть здійснювати формування регулярного мікрорельєфу).

Алгоритм визначення оптимального значення осьового кроку S_o канавок полягає у наступному.

Користувач вводить вихідні дані (модуль 2), зокрема значення амплітуди коливань A_k , кількості елементів канавки N_{el} , радіус розміщення елементів РМР R_{kc} , радіус відбитку ρ_k , осьовий кроку S_o .

Введеному значенню осьового кроку канавок S_o присвоюється значення змінної S_{oi} (модуль 3).

Система порівнює значення осьового кроку із умовою формування РМР з канавками V-подібної форми частково регулярного мікрорельєфу III виду із зміщенням на 0,5 кутового кроку (модуль 4), а саме

$$S_{oi} < A_{k1} + A_{k2} + 2\rho_k \quad (4.126)$$

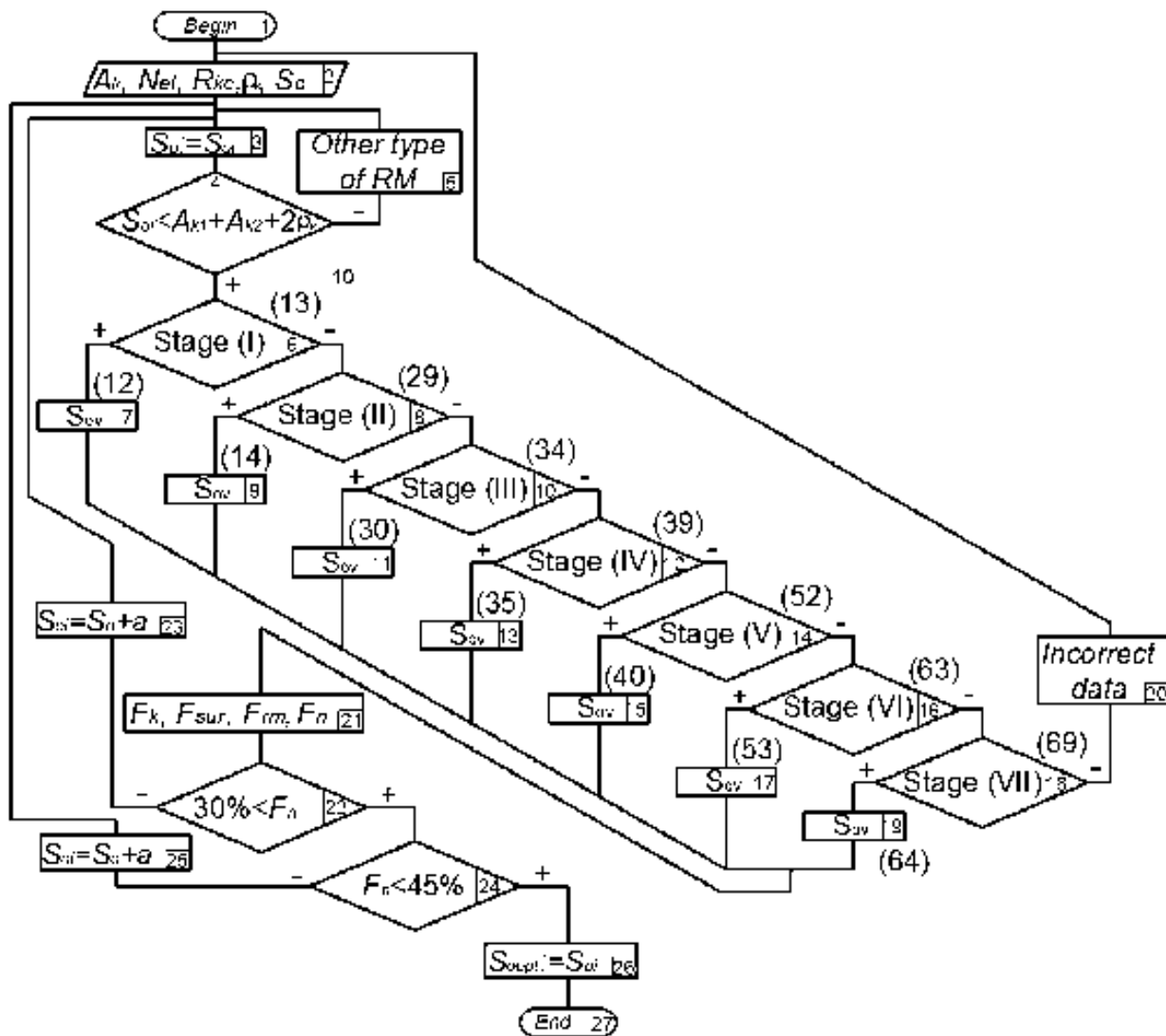


Рисунок 4.23 – Блок-схема алгоритму визначення оптимального значення осьового кроку S_o

Якщо ця умова не виконується, то система видає повідомлення про те, що умова формування РМР III виду не виконується (модуль 5). Якщо умова (модуль 4) виконується, то система перевіряє до якої з семи стадій процесу перекриття належить введене значення осьового кроку S_{oi} (модулі 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18). При виконанні однієї з цих умов здійснюється розрахунок площі перекриття канавок за формулами із статті, нумерація яких наведена у дужках (модулі 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19).

Якщо жодна умова не виконується система видає повідомлення про некоректні дані (модуль 20).

Після цього визначаються величини, що входять у формулу для визначення відносної площі віброобкочування, зокрема F_k , F_{sur} , F_{rm} (модуль 21). Маючи значення цих величин система визнає значення відносної площі віброобкочування F_n та перевіряє чи є воно більшим мінімально допустимого значення 35% (модуль 22). Якщо ні, то система збільшує значення змінної S_{oi} на величину a (модуль 23) і процес повторюється знову з модуля 3.

Якщо ж отримане значення відносної площі віброобкочування F_n більше мінімально допустимого значення, то система перевіряє чи є його меншим максимально допустимого значення 45% (модуль 24).

Якщо отримане значення F_n більше гранично допустимого, то система зменшує значення S_{oi} на величину a (модуль 25) і процес повторюється знову з модуля 3.

Якщо ж отримане значення відносної площі віброобкочування F_n знаходиться в межах 30 % - 45 % система видає повідомлення що значення параметра S_{oi} знаходиться в оптимальних межах (модуль 26).

4.6 Висновки до четвертого розділу

1. Вперше запропонована класифікація ЧРМ сформованих на ТПТО, здійснена на основі особливостей кінематики технологічного процесу формування ЧРМ, яка може бути основою для створення математичних моделей ЧРМР і визначення відносної площі віброобкочування.

2. Вперше за допомогою аналітичних залежностей були описані характеристики канавок ЧРМ, сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання вібраційним. На основі розробленої множини варіантів канавок ЧРМ і з використанням блочного підходу вперше розроблені їх математичні моделі, які у подальшому дозволять встановити елементи режиму формування і забезпечити необхідне значення відносної площі віброобкочування.

3. При формуванні частково регулярних мікрорельєфів на різній відстані від центру обертання торцевих поверхонь тіл обертання, параметри елементів мікрорельєфу змінюються, що призводить до зміни площі канавок ЧРМ від 4 до 6 разів в діапазоні значень параметра R_k в межах від 40 до 160 мм. Отримано аналітичну залежність для визначення площі елемента канавки трикутної форми ЧРМ сформованого на ТПТО в залежності від його геометричних параметрів. На основі аналізу залежностей площі елемента ЧРМ від радіуса R_k його розміщення при різних значеннях кількості елементів N_k , амплітуді A_k , та радіусі канавки ρ_k встановлено, що найбільший вплив на зміну площі елемента ЧРМ чинить радіус канавки.

4. Розглянуто можливі схеми розміщення канавок ЧРМ, при яких встановлено що для забезпечення однакової відносної площі частково регулярного мікрорельєфу I типу, сформованого на ТПТО потрібно змінювати амплітуду коливань деформувального елемента A_k із зміною радіуса траєкторії середньої лінії R_{kc} віброобкатника. Встановлено що при формуванні ЧРМ на ділянках незначної ширини (менше 20 мм) амплітуду коливань можна приймати постійною. Отримано залежність для визначення амплітуди коливань деформувального елемента при формування частково регулярного мікрорельєфу з канавками V-подібної форми за умови забезпечення однакової відносної площі мікрорельєфу.

5. Проаналізувавши схему розташування канавок частково регулярного мікрорельєфу II виду із канавками V-подібної форми зміщеними на 0,5 кутового кроку, сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання встановлено, що для забезпечення стабільної величини відносної площі частково регулярного мікрорельєфу сформованого на ТПТО потрібно змінювати амплітуду коливань A_{k2} деформувального елемента одночасно зі зміною радіуса R_{kc} траєкторії середньої лінії канавки. При цьому встановлено, що при формуванні ЧРМ на ділянках незначної ширини (менше 30 мм) амплітуду коливань можна приймати постійною, оскільки відносна площа віброобкочування при цьому зміниться менше ніж на 10 %. На поверхнях із

значною площею віброобкочування доцільно здійснювати коригування амплітуди коливань для забезпечення стабільної величини відносної площі мікрорельєфу.

6. Проаналізовано можливі схеми взаємного розміщення елементів канавок ЧРМ V-подібної форми III виду, сформованих на ТПТО та визначено площу перекриття для кожного із розглянутих схем взаємного розміщення елементів канавок частково регулярного мікрорельєфу, сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання та встановлено умови їх існування. Встановлено, що характер зміни цієї площі залежно від осьового кроку носить нелінійний характер.

7. Визначено діапазон значень осьового кроку частково регулярного мікрорельєфу для кожної схеми взаємного розміщення елементів канавок ЧРМ. Побудована графічна залежність площі перекриття канавок ЧРМ від геометричних параметрів V-подібних канавки, яка показує, що існують стадії перекриття, на яких площа перекриття канавок стрімко зростає (стадії I-IV) або майже не змінюється (стадії V-VII). Отримані аналітичні залежності дозволять забезпечити необхідну площу віброобкочування шляхом зміни осьового кроку ЧРМ в заданому діапазоні значень. Розроблено алгоритм визначення оптимального значення осьового кроку S_o канавок V-подібної форми для ЧРМ, сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання.

Розділ 5

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ, СФОРМОВАНИХ НА ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХНЯХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ

5.1. Обладнання та інструмент для проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводились з метою перевірки теоретичних гіпотез, представлених в четвертому розділі роботи з метою:

– перевірки правильності побудови математичних моделей, які описують частково-регулярні мікрорельєфи, сформовані на тоцевих поверхнях тіл обертання та наведені в розділі 4.2;

– визначення впливу технологічних параметрів процесу формування ЧРМ, таких як зусилля деформування, швидкість деформування і геометричних параметрів мікрорельєфу (осьової відстані між канавками мікрорельєфу) на ширину канавки мікрорельєфу;

– підтвердження гіпотези про необхідність дотримання нестабільного значення осьового кроку мікрорельєфу для забезпечення однакової відносної площі віброобкочування, наведених в розділах 4.4 і 4.5;

– визначення параметрів якості (шорсткості поверхні та її твердості) із сформованим ЧРМ для канавок мікрорельєфу, сформованого на різній відстані від центра обертання торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання».

Для проведення експериментальних досліджень було залучено обладнання кафедри Промислових технологій і машин Технічного університету Варни (Болгарія). Зокрема дослідження проводились на фрезерному верстаті з ЧПК ТМ-1 (рис. 5.1), технічна характеристика якого наведені в додатку 7.



Рисунок 5.1 – Загальний вигляд фрезерного 5-ти координатного верстату
ТМ-1

Експериментальні дослідження було проведено на дослідному зразку, креслення якого зображено на (рис. 5.2). Для отримання координат необхідних для побудови циклограми руху інструменту було використано математичну модель ЧРМ V-подібної форми, сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання» із траєкторією осьових ліній симетрії у вигляді концентричних кіл, розміщених на різній відстані від центра деталі.

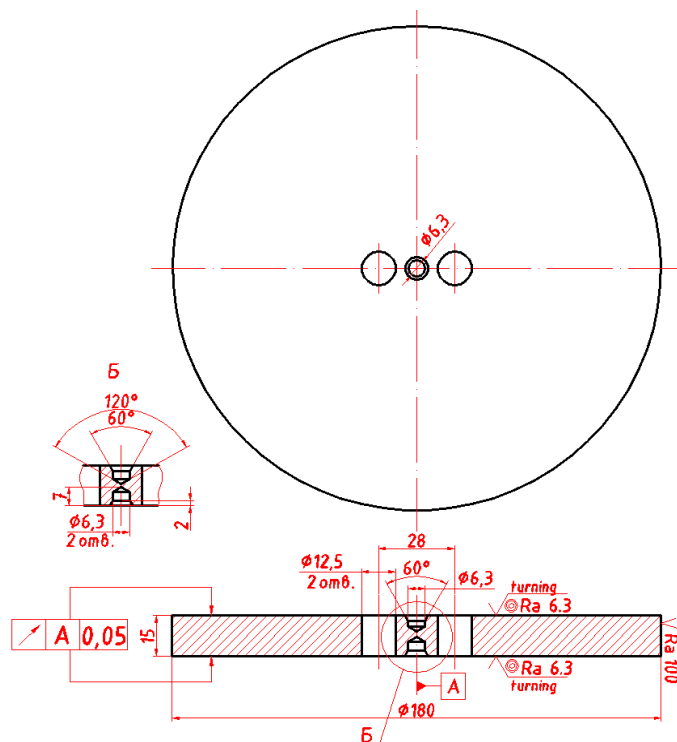
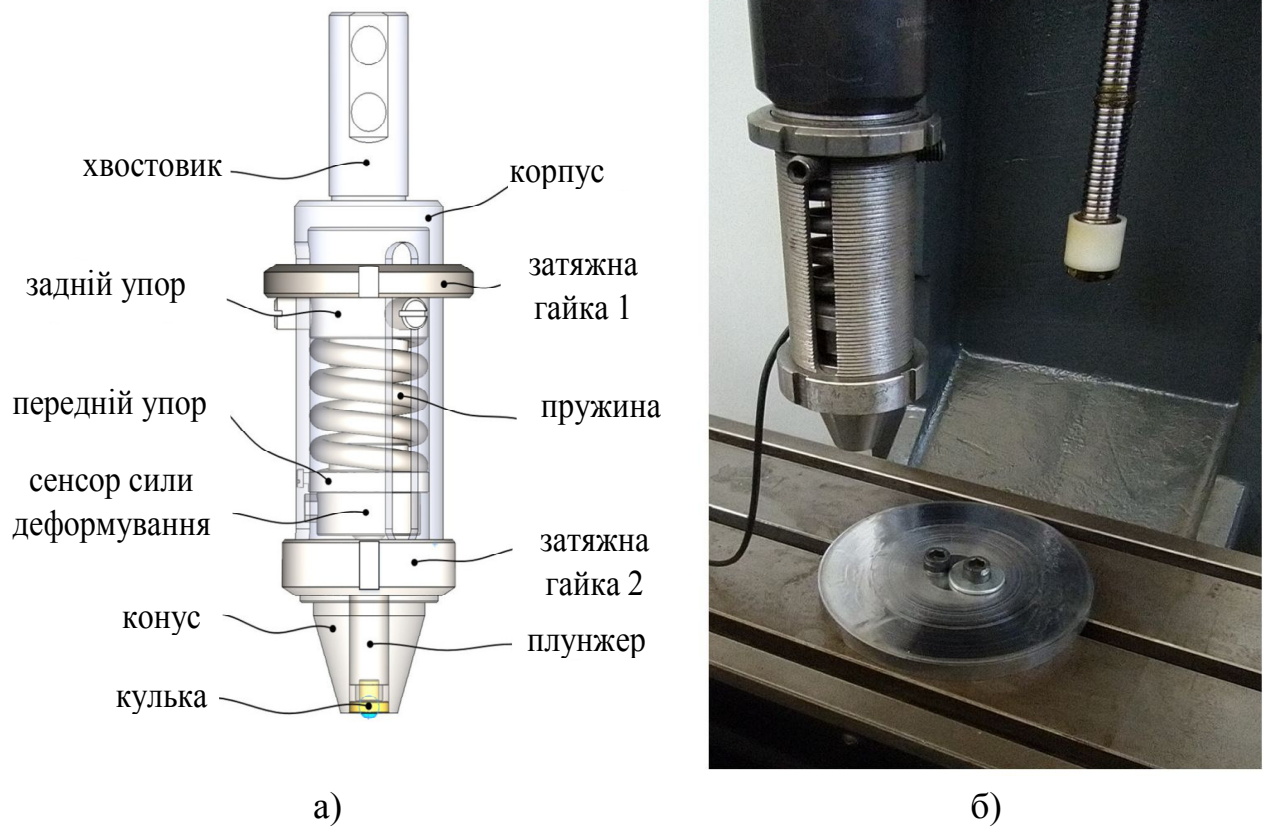


Рисунок 5.2 – Зразок для проведення експериментальних досліджень
а) креслення; б) реальний вигляд

Для формування ЧРМ використовували спеціальний інструмент розроблений для формування мікрорельєфів із можливістю зміни зусилля деформування (рис. 5.3).



а) схема інструменту; б) встановлення інструменту на верстаті ТМ-1
 Рисунок 5.3 – Схема інструменту та встановлення його на фрезерному 5-ти координатному верстаті для формування ЧРМ на торцевих поверхнях тіл обертання безвібраційним способом

Технічною особливістю даного інструменту є те, що він забезпечує необхідне зусилля деформування в межах до 1300 Н, а контрольні прилади дозволяють фіксувати це значення в режимі реального часу. Діаметр кульки при формуванні ЧРМ становив 6 мм.

5.2 Програма і методика проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження виконувались відповідно до розробленої програми, що включала такі етапи:

- вибір розмірів, форми і матеріалів досліджуваних зразків та схем обробки для формування канавок;
- проектування та виготовлення спеціального інструменту для дослідження процесу формування канавок на поверхнях дослідного зразка;
- вибір вимірювального обладнання та інструментів, що дозволяють встановити параметри утворених канавок;
- розроблення методики проведення повнофакторного експерименту та виведення рівнянь регресії залежності параметрів утворених канавок від змінних факторів;
- проведення досліджень в лабораторних умовах на серійному обладнанні;
- статистичне оброблення результатів експериментів з метою визначення рівнянь регресії та емпіричних залежностей, що адекватно описують досліджувані процеси;
- оцінювання впливу зусиль деформування, швидкості подачі деформувального інструменту та відстані між осями канавок на ширину утворених канавок.

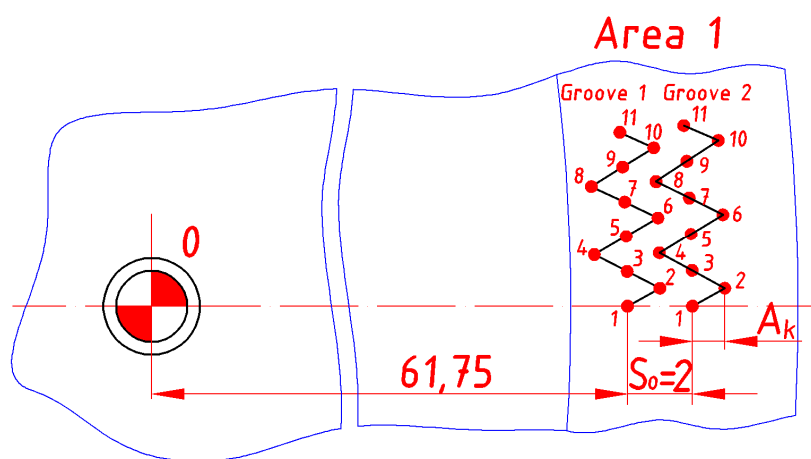
Для досягнення мети досліджень була розроблена програма експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження планувались у вигляді повно факторного експерименту з одночасною зміною трьох факторів.

Змінними факторами було обрано зусилля деформування, швидкість подачі інструменту та осьовий крок канавок. Саме ці фактори при незначній їх зміні чинять найбільший вплив на зміну ширини сформованої канавки [123, 124] і, відповідно, площі частково регулярного мікрорельєфу при його формуванні на торцевих поверхнях. Крім цього дані параметри є

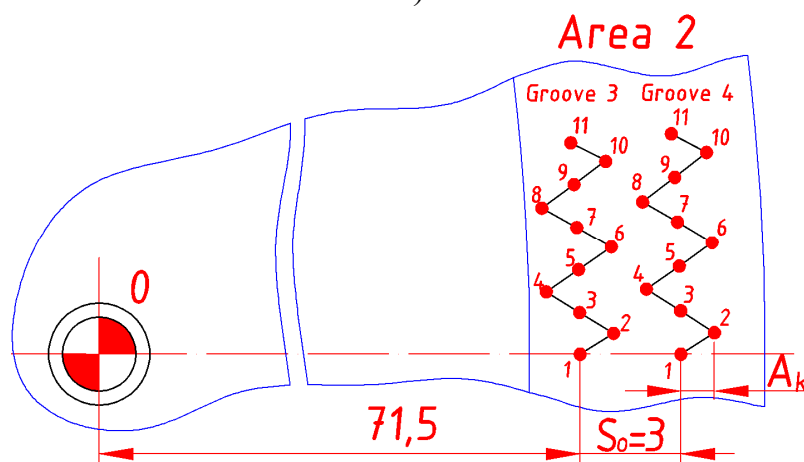
взаємозалежними і легко контрольованими під час виконання операції формування частково регулярного мікрорельєфу. Зусилля деформування згідно рекомендацій [269] становило від 200 до 600 Н.

Вплив осьового кроку S_o на ширинку канавки b_k можливий лише за умови достатньо малого його значення, при якому канавки будуть розміщені досить близько одна до одної. Тому діапазон значень осьового кроку було вибрано в межах від 2 до 4 мм з кроком через 1 мм. Геометричні параметри канавок мікрорельєфу які були спільними для всіх зон та ділянок: амплітуда – $A_k=1$ мм; кількість елементів на проміжку $0..2\pi$: $n_{el}=180$ шт.; коефіцієнт зміщення – $\gamma_d=0$; форма канавок мікрорельєфу – трикутна.

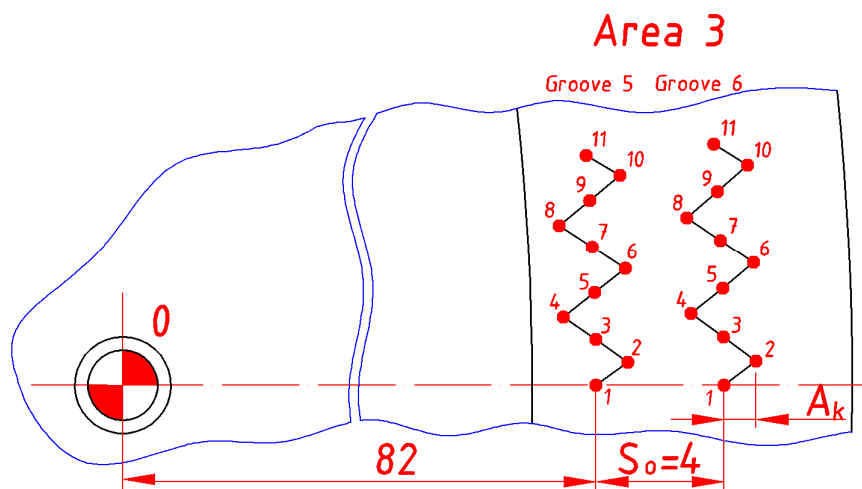
Схематично траєкторію руху інструменту при формуванні канавок зображено на рисунку 5.4.



а)



б)



в)

а) в зоні 1 при $S_o=2$ мм; в зоні 2 при $S_o=3$ мм; в) в зоні 3 при $S_o=4$ мм.

Рисунок 5.4 – Схема руху інструменту по координатних точках при формуванні канавок:

Відповідно до математичного методу планування експерименту перед початком досліджень проведено розширений аналіз процесу формування канавок деформувальними елементами та вибір параметрів проведення дослідів для вирішення поставлених завдань з необхідною точністю. Використання математичного апарату дозволило формалізувати експериментальні дослідження, при цьому проведено варіювання одночасно трьох основних факторів, рівні яких прийнято за результатами пробних експериментальних досліджень, а кількість дослідів зведено до мінімуму з відповідним обґрунтованим рішенням, що забезпечило скорочення часу проведення дослідів та матеріальних ресурсів.

Повнофакторний експеримент складався з таких етапів планування і проведення [77]:

- кодування факторів;
- складання плану-матриці експерименту;
- рандомізація дослідів;
- реалізація плану експерименту;
- оцінка значущості коефіцієнтів регресії;
- перевірка адекватності моделі.

Дослідження проводились із використання спеціального обладнання та інструментів. Усі етапи пов'язані дослідженням впливу конструктивних та технологічних параметрів процесу формоутворення на ширину утворених канавок.

Для формування канавок на робочих поверхнях деталей машин визначено основні змінні фактори, що впливали на процес деформації:

- зусилля деформування $F_{d,i}=200 - 600$ Н;
- швидкість подачі деформувального елемента $f_{in,i}$, 500-1500 мм/хв;
- відстань між осями канавок $S_o=2-4$ мм.

Проведено кодування представлених факторів для переведення їх у безрозмірні величини для побудови плану-матриці експерименту.

Після деформування поверхні та вимірювання отримано числові значення глибини утворених канавок, які заносили у відповідні таблиці результатів повнофакторного експерименту.

Оброблення отриманих результатів експериментальних масивів проводили за загальновідомими методиками та методами статистичного оброблення з використанням відомих методик кореляційного й регресійного аналізу експериментальних даних [77, 237] для отримання у кінцевому результаті емпіричних рівнянь регресії.

Для отримання регресійної моделі процесу утворення канавок, тобто залежності ширини утворених канавок b_k від зусилля деформування $F_{d,i}$, швидкості подачі деформувального елемента $f_{in,i}$, та міжосьової відстані між канавками S_o , або $b_i=f(F_{d,i}, f_{in,i}, S_o)$ вибирали відповідний умовний план експерименту, який реалізовували у визначеній послідовності.

Оскільки під час проведення експериментів змінні незалежні фактори $F_{d,i}$, $f_{in,i}$ та S_o неоднорідні та мають різний вплив на глибину утворених канавок b_i , то їх приводили до єдиної системи обрахунків шляхом переходу від дійсних значень до кодованих.

Зв'язок між кодованими x_i та натуральними X_i змінними факторами встановлювали за залежністю [77, 237]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (5.1)$$

де X_{i0} - натуральне значення i -го фактору на нульовому рівні;

ΔX_i - інтервал варіювання i -го фактору.

Повнофакторний експеримент проведено на трьох рівнях варіювання факторами. Нульовий рівень або середнє значення кожного вхідного фактору, визначено за формулою:

$$X_{0i} = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}, \quad (5.2)$$

де X_{0i} - числове значення нульового рівня вхідного фактору;

$X_{i\max}$ - числове значення верхнього рівня вхідного фактору;

$X_{i\min}$ - числове значення нижнього рівня вхідного фактору.

Визначено інтервали варіювання факторами:

$$\Delta X_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}. \quad (5.3)$$

Введено умовні позначення верхнього, нижнього та нульового рівнів варіювання факторів, відповідно +1, -1, 0 для побудови план-матриці планування експериментів.

Визначено основний (нульовий) рівень для кожного фактору:

- для зусилля деформування $F_{d.i}$:

$$X_{01} = \frac{200 + 600}{2} = 400 \text{ (Н)}; \quad (5.4)$$

- для швидкості подачі деформувального елемента $f_{in.i}$:

$$X_{02} = \frac{500 + 1500}{2} = 1000 \text{ (мм/хв)}; \quad (5.5)$$

- міжосьової відстані між канавками S_o :

$$X_{03} = \frac{2+4}{2} = 3 \text{ (мм)}. \quad (5.6)$$

Інтервали варіювання та кодовані значення кожного фактору відповідно дорівнюють:

$$\Delta X_1 = \frac{600-200}{2} = 200 \text{ (Н)}; \quad x_1 = \frac{F_{d.i} - 400}{200}; \quad (5.7)$$

$$\Delta X_2 = \frac{1500-500}{2} = 500 \text{ (мм)}; \quad x_2 = \frac{f_{in.i} - 1000}{2}; \quad (5.8)$$

$$\Delta X_3 = \frac{4-2}{2} = 1 \text{ (мм)}; \quad x_3 = \frac{S_o - 3}{1}. \quad (5.9)$$

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати вибору рівнів варіювання та кодування факторів при встановленні ширини утворених канавок b_k під час деформування поверхні спеціальними інструментами

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Зусилля деформування	$F_{d.i}$, Н	x_1	200	600 (+1)	400 (0)	200 (-1)
Швидкість подачі	$f_{in.i}$ мм/хв	x_2	500	1500 (+1)	1000 (0)	500 (-1)
Відстань між осями канавок	S_o , мм	x_3	1	4 (+1)	3 (0)	2 (-1)

Попередній аналіз результатів досліджень свідчить, що досліджуваний процес формування канавки не можна описати лінійною моделлю, оскільки у поверхні відгуку переважають рівняння регресії, що характеризують ефекти взаємодії та квадратичні форми. Щоб описати таку залежність необхідно використати плани другого порядку, в яких кожна змінна має варіюватися мінімум на трьох рівнях. У загальному випадку для трьох факторів модель другого порядку можна записати так [2]:

$$b_k = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1 \cdot x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (5.10)$$

де b_k – вибіркова оцінка функції, що вивчається (ширина канавки ЧРМ сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання»);

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – вибіркові коефіцієнти рівняння регресії;

x_1, x_2, x_3 – незалежні змінні, яким в нашому випадку відповідають: осьовий крок нерівностей S_o , зусилля деформування F_d та швидкість подачі f_i .

Коефіцієнти рівняння регресії визначали за допомогою матриць планування та результатів експерименту. Оскільки немає даних про положення екстремальної точки, хід технологічних процесів майже в стаціонарній області доцільно описувати, використовуючи плани. За допомогою цього плану можна отримати модель (5.10), яка з однаковою точністю передбачає значення параметра оптимізації в усіх точках факторного простору, що знаходяться на однаковій відстані від центра.

Щоб знайти адекватну модель процесу був реалізований центральний ротатабельний план при сукупності трьох факторів ($k=3$). Рівні та інтервали варіювання незалежних змінних, а також робоча матриця плану наведена в таблиці 5.1. Дослідження ведемо по загальній методиці [137].

У ході дослідження реалізовано повний факторний експеримент 3^3 . Для реалізації складеної план-матриці та усунення впливу неконтрольованих і нерегульованих факторів (перепади напруги, неоднорідність матеріалу) на значення параметрів моделі, проведено рандомізацію дослідів шляхом використання таблиць випадкових чисел.

План експерименту та результати дослідів показано в таблиці 5.2 [2, 137].

Таблиця 5.2 – План-матриця проведення повного факторного експерименту 3^3 для

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У			Середні значення
									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	b _{сер.}
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	b11	b12	b13	b1c
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	b21	b22	b23	b2c
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	b31	b32	b33	b3c
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	b41	b42	b43	b4c
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	b51	b52	b53	b5c
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	b61	b62	b63	b6c
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	b71	b72	b73	b7c
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	b81	b82	b83	b8c
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	b91	b92	b93	b9c
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	b101	b102	b103	b10c
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	b111	b112	b113	b11c
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	b121	b122	b123	b12c
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	b131	b132	b133	b13c
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	b141	b142	b143	b14c
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	b151	b152	b153	b15c
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	b161	b162	b163	b16c
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	b171	b172	b173	b17c
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	b181	b182	b183	b18c
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	b191	b192	b193	b19c
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	b201	b202	b203	b20c
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	b211	b212	b213	b21c
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	b221	b222	b123	b22c
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	b231	b232	b233	b23c
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	b241	b242	b243	b24c
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	b251	b252	b253	b25c
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	b261	b262	b263	b26c
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	b271	b272	b273	b27c

Коефіцієнти моделі другого порядку (5.10) визначаємо за формулами:

$$b_0 = a_1 \cdot \sum_{u=1}^N \bar{b}_u - a_2 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \bar{b}_u ; \quad (5.11)$$

$$b_i = a_3 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot \bar{b}_u ; \quad i = 1, 2, 3; \quad (5.12)$$

$$b_{ij} = a_4 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \bar{b}_u ; \quad 1 \leq i < j \leq k ; \quad (5.13)$$

$$b_{ii} = a_5 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \bar{b}_u - a_6 \cdot \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^k x_{iu}^2 \cdot \bar{b}_u - a_7 \cdot \sum_{u=1}^N \bar{b}_u . \quad (5.14)$$

де x_{iu} - значення кодованої змінної у відповідному стовпці плану експерименту;

\bar{b}_u - середній результат u -го досліду;

u - порядковий номер досліду;

i - номер фактору;

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

n - кількість серій дослідів.

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – допоміжні константи, наведені в літературі [2].

Визначали дисперсію похибок дослідів у рядках план-матриці:

$$S_u^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{uj} - \bar{y}_u)^2 , \quad (5.15)$$

де n – кількість паралельних дослідів (повторюваностей одного експерименту);

Визначали дисперсію відтворення дослідів:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2 , \quad (5.16)$$

Щоб перевірити значущість коефіцієнтів, визначаємо їх дисперсії за формулами:

$$S_{b_0}^2 = a_8 \cdot S_y^2; \quad S_{b_i}^2 = a_9 \cdot S_y^2; \quad (5.17)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = a_{10} \cdot S_y^2; \quad S_{b_{ii}}^2 = a_{11} \cdot S_y^2, \quad (5.18)$$

де S_y^2 - дисперсія помилки досліду;

a_8, a_9, a_{10}, a_{11} , – допоміжні константи, наведені в літературі [137].

Також визначаємо надійні інтервали коефіцієнтів за залежностями:

$$\Delta b_0 = t_T \cdot S_{b_0}; \quad \Delta b_i = t_T \cdot S_{b_i}; \quad (5.19)$$

$$\Delta b_{ij} = t_T \cdot S_{b_{ij}}; \quad \Delta b_{ii} = t_T \cdot S_{b_{ii}}, \quad (5.20)$$

де t_T - значення t - критерію Стьюдента, вибране при заданому рівні значущості α і числі ступенів волі f_n .

Якщо виконується умова $|b_i| \geq \Delta b_i$, то коефіцієнти регресії вважаються значущими, тобто їх вплив на функцію відгуку перевищує похибки вимірювання.

Гіпотезу про адекватність отриманої математичної моделі перевіряли за допомогою F - критерію Фішера:

$$F = \frac{S_H^2}{S_n^2}, \quad (5.21)$$

де S_H^2 - дисперсія неадекватності.

Дисперсію неадекватності визначали за формулою:

$$S_H^2 = \frac{\sum_{u=1}^N n \cdot (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - k'}, \quad (5.22)$$

де b_u - значення функції в u - му рядку, обчислене за знайденою математичною моделлю;

k' - кількість значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

Якщо $F \leq F_T$, вибраного при знайденому значенні надійної ймовірності

α і числа ступенів волі f_H, f_n , то отримана модель вважається адекватною, її можна використовувати для опису досліджуваного процесу.

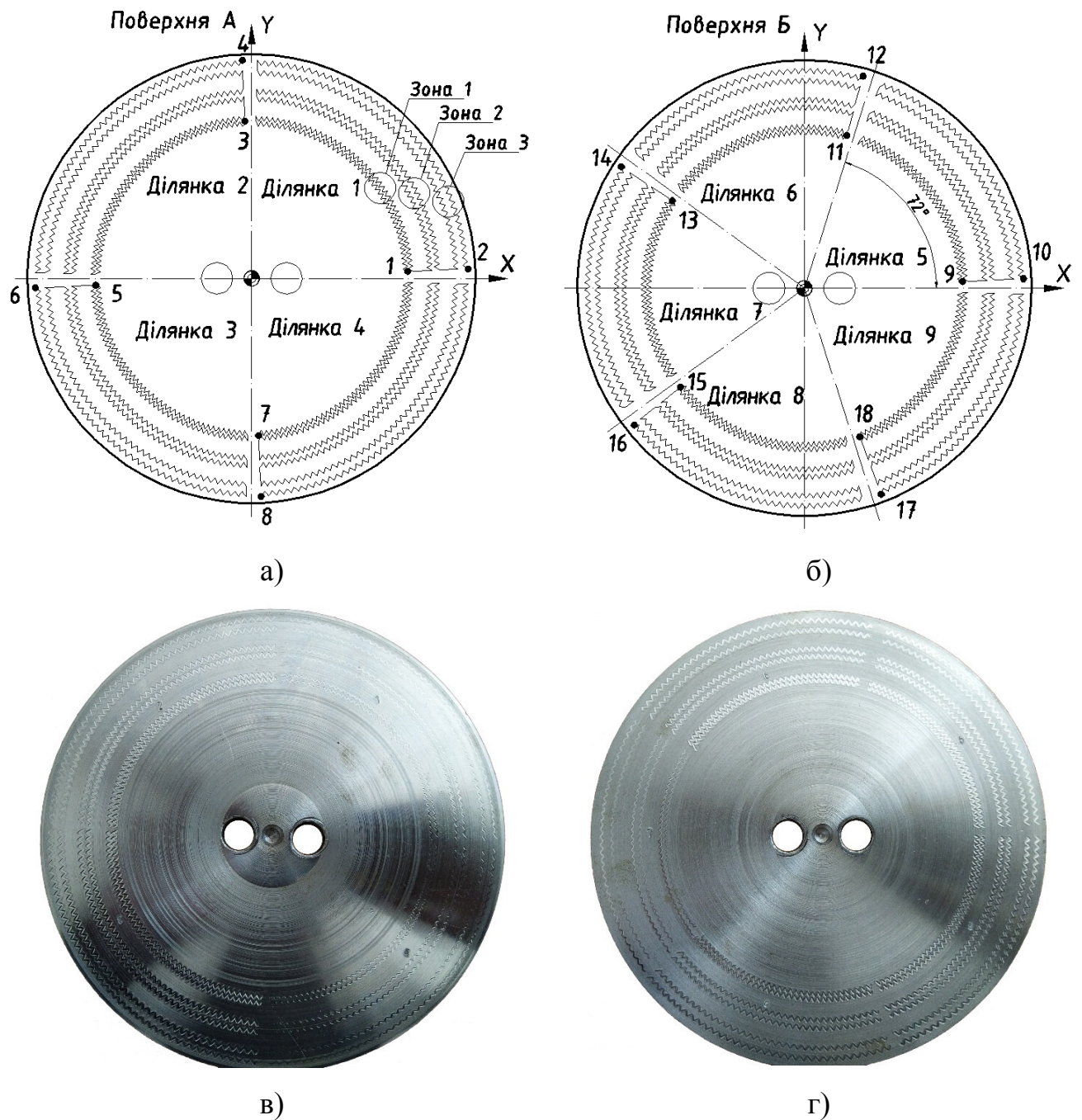
За результатами розрахунків, які проведено за допомогою пакету прикладних статистичних програм оброблення та аналізу результатів експериментальних досліджень для ПК, побудовано залежності поверхні відгуку параметрів оптимізації та двомірний переріз поверхні відгуку для наочного зображення результатів проведених експериментальних досліджень.

Аналіз випадковості процесу оцінено за стандартними методиками, при цьому визначено математичне сподівання M , дисперсію випадкової величини D та коефіцієнт варіації V .

Залежність параметра оптимізації, тобто залежність ширини утворених канавок b_i від зміни одного вхідного фактора за постійних значень інших факторів побудовано за допомогою спеціалізованих пакетів прикладних програм.

Апроксимацію отриманої експериментальної ломаної лінії, побудованої за результатами проведених досліджень, проведено за відомими стандартними методиками, при цьому величину відхилення визначено за способом найменших квадратів.

Форма і розміри дослідного зразка спроектовано таким чином щоб максимально використати його площу. Їх забезпечено токарними операціями. Тому обидві його поверхні було поділено на дев'ять секцій, щоб на одному зразку можна було провести повнофакторний експеримент із отриманням 27 ділянок (рис 5.5) із мікрорельєфами отриманими при режимах, які розраховані в програмі проведення досліджень. Координати траєкторії руху інструменту були розраховані за допомогою програми написаної в середовищі MathCAD на основі математичних моделей описаних в роботі [16] та п. 4.2 дисертації.



1-2,..17-18 – точки початку та кінця траєкторії руху інструменту при формуванні ЧРМ; а), в) поверхня А дослідного зразка; б), г) поверхня Б дослідного зразка

Рисунок 5.4 – Дослідний зразок із розміткою контрольних точок руху інструменту та позначенням секцій для нанесення

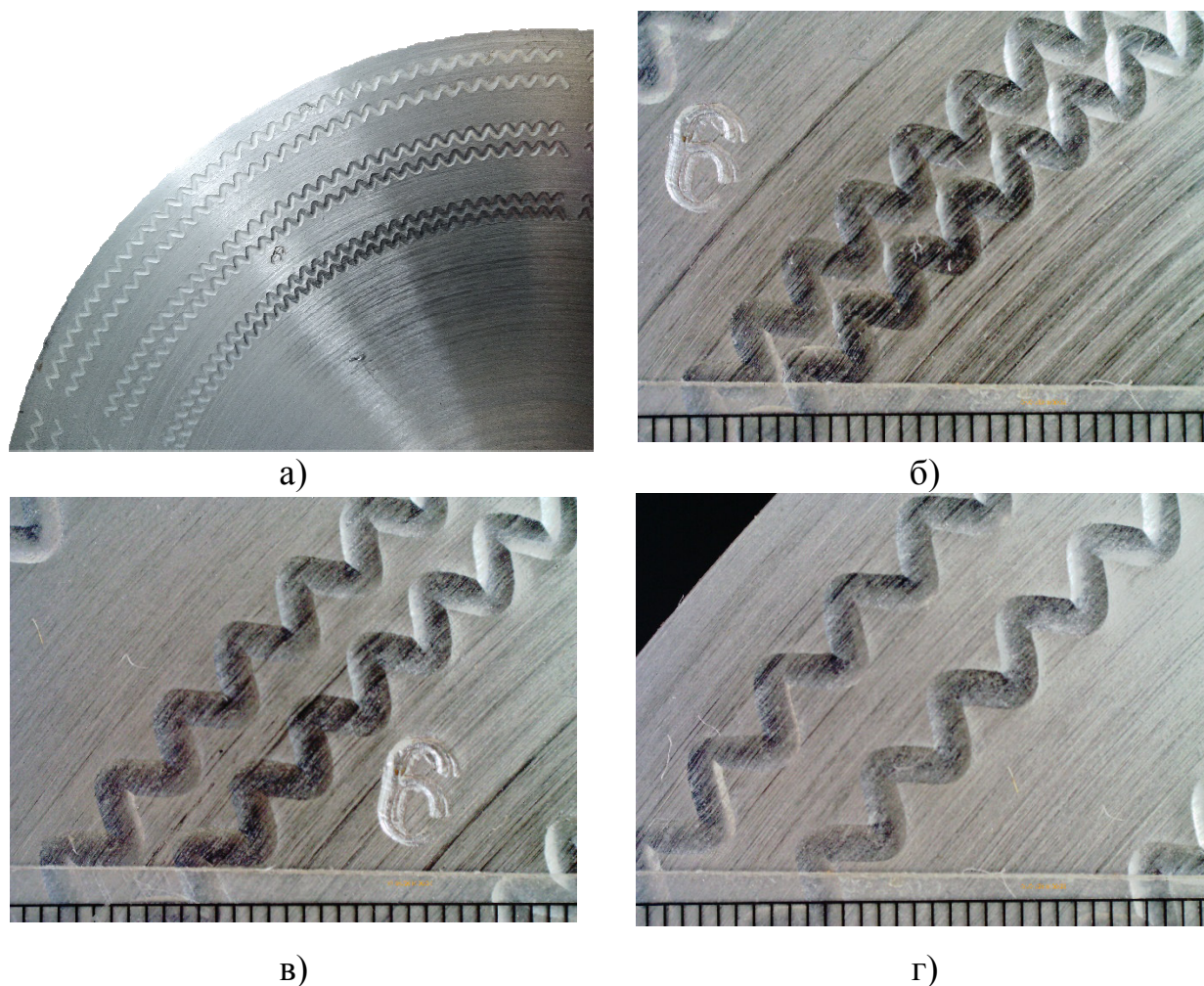
На поверхні кожної із цих дев'яти секцій був сформований ЧРМ з режимами вказаними у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Значення змінних параметрів для проведення експериментальних досліджень

№ досліджу	Секція	Зона	Осьовий крок нерівностей $S_{o,i}$, мм	Зусилля деформування $F_{d,i}$, Н	Швидкість подачі $f_{in,i}$, мм/хв
1	1	1	2	200	500
2		2	3	200	500
3		3	4	200	500
4	2	1	2	400	500
5		2	3	400	500
6		3	4	400	500
7	3	1	2	600	500
8		2	3	600	500
9		3	4	600	500
10	4	1	2	200	1000
11		2	3	200	1000
12		3	4	200	1000
13	5	1	2	400	1000
14		2	3	400	1000
15		3	4	400	1000
16	6	1	2	600	1000
17		2	3	600	1000
18		3	4	600	1000
19	7	1	2	200	1500
20		2	3	200	1500
21		3	4	200	1500
22	8	1	2	400	1500
23		2	3	400	1500
24		3	4	400	1500
25	9	1	2	600	1500
26		2	3	600	1500

5.3 Результати експериментальних досліджень ширини канавки мікрорельєфу

Значення параметра b_k одержували шляхом його вимірювання на фотографіях (рис. 5.5) кожної із 27 зон дослідного зразка, отриманих за допомогою digital microscope DigiMicro Lab 5.0+. Фотографії всіх інших канавок наведені в додатку 9 дисертаційної роботи.



а) загальний вигляд ділянки 9; б) при $S_o=2$ мм; в) при $S_o=3$ мм; г) при $S_o=4$ мм

Рисунок 5.5 – Частково регулярний мікрорельєф, сформований на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання» з різним осьовим кроком

Перед здійсненням замірів ширини сформованих канавок здійснювалось калібрування кожної фотографії за допомогою програмного забезпечення

PortableCapture Pro. Після цього визначали реальні розміри ширини канавок $b_{k,i,j}$.

Для одержання достовірних результатів досліджень сформували статистичні вибірки із десяти значень досліджуваного параметра – ширини канавки $b_{k,i,j}$, де i – порядковий номер досліду ($i=1..27$), j – порядковий номер виміру значення ширини канавки ($j=1..10$). Таким чином було отримано 270 значень параметра $b_{k,i,j}$. Сформовані статистичні ряди перевіряли на однорідність за критерієм Греббса [157], яка використовується для статистичних вибірок із невеликою кількістю значень, визначали математичне сподівання параметра $b_{k,i}$ для кожного досліду, яке приблизно дорівнює середньому значенню та зводили їх в таблицю 5.4.

Отримавши значення параметра b_k для кожного із дослідів здійснюємо виведення коефіцієнтів регресії та побудову математичної моделі, яка буде описувати вплив режимів формування частково регулярного мікрорельєфу та взаємного розміщення канавок на величину ширини канавок.

Загальний вигляд рівняння регресії ширина канавки залежно від зміни осьового кроку нерівностей $S_{o,i}$, зусилля деформування $F_{d,i}$ та швидкості подачі $f_{in,i}$, тобто $b_{(x_1, x_2, x_3)} = f(S_{o,i}, F_{d,i}, f_{in,i})$ за результатами проведеного повнофакторного експерименту ПФЕ 3^3 у кодованих величинах:

$$b_{(x_1, x_2, x_3)} = 0,867 + 0,0015x_1 + 0,235x_2 - 0,0058x_3 - 0,00625x_1x_2 - 0,00975x_1x_3 - 0,008x_2x_3 + 0,004x_1^2 - 0,064x_2^2 - 0,0075x_3^2, \quad (5.23)$$

де x_1 - кодоване значення осьового кроку нерівностей; x_2 - кодоване значення зусилля деформування; x_3 - кодоване значення швидкості подачі.

Встановлені коефіцієнти рівняння регресії представлено у табл. 5.5.

Таблиця 5.4 – Результати експериментальних досліджень параметра b_k

№ заміру № дослід y	Ширина канавки, $b_{k,i,j}$ мм										Вибіркові характеристики $b_{k,i,j}$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$M(b_k)$	$D(b_k)$
1	0.57	0.56	0.54	0.56	0.54	0.53	0.56	0.56	0.54	0.53	0.544	1.214×10^{-4}
2	0.57	0.59	0.57	0.55	0.58	0.57	0.54	0.59	0.55	0.56	0.567	1.470×10^{-4}
3	0.59	0.58	0.55	0.61	0.58	0.56	0.58	0.61	0.53	0.62	0.584	8.301×10^{-4}
4	0.85	0.82	0.82	0.84	0.83	0.84	0.85	0.87	0.84	0.86	0.846	1.403×10^{-4}
5	0.85	0.86	0.86	0.88	0.87	0.85	0.84	0.87	0.86	0.84	0.861	6.815×10^{-5}
6	0.83	0.89	0.86	0.86	0.87	0.83	0.85	0.89	0.84	0.87	0.862	1.593×10^{-4}
7	1.04	1.06	1.03	1.01	1.05	1.08	1.07	1.06	1.03	1.06	1.046	2.816×10^{-4}
8	1.03	1.04	1.06	1.05	1.05	1.08	1.05	1.05	1.06	1.04	1.049	1.261×10^{-4}
9	1.01	1.04	1.07	1.04	1.03	1.06	1.01	1.08	1.06	1.05	1.052	1.2384×10^{-4}
10	0.56	0.54	0.6	0.57	0.55	0.51	0.6	0.6	0.53	0.57	0.560	5.763×10^{-4}
11	0.54	0.54	0.56	0.58	0.57	0.57	0.58	0.56	0.54	0.57	0.564	1.192×10^{-4}
12	0.60	0.58	0.58	0.60	0.62	0.55	0.59	0.56	0.57	0.56	0.570	1.952×10^{-4}
13	0.84	0.83	0.86	0.86	0.88	0.84	0.86	0.83	0.89	0.88	0.869	2.941×10^{-4}
14	0.86	0.84	0.85	0.86	0.87	0.85	0.88	0.87	0.88	0.87	0.869	6.253×10^{-5}
15	0.86	0.87	0.87	0.87	0.86	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.870	1.512×10^{-5}
16	1.05	1.04	1.05	1.08	1.02	1.09	1.00	1.07	1.02	1.06	1.049	5.542×10^{-4}
17	1.04	1.02	1.05	1.02	1.03	1.03	1.06	1.02	1.04	1.04	1.039	7.744×10^{-5}
18	1.01	1.06	1.02	1.06	1.01	1.03	1.01	1.02	1.03	1.06	1.036	2.297×10^{-4}
19	0.58	0.57	0.56	0.55	0.55	0.57	0.59	0.56	0.58	0.57	0.571	8.276×10^{-5}
20	0.58	0.59	0.58	0.59	0.55	0.57	0.58	0.56	0.56	0.57	0.567	7.219×10^{-5}
21	0.57	0.55	0.54	0.55	0.56	0.56	0.54	0.55	0.55	0.59	0.563	2.604×10^{-4}
22	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.86	0.85	0.84	0.85	0.85	0.849	1.765×10^{-5}
23	0.84	0.84	0.84	0.85	0.85	0.86	0.85	0.86	0.86	0.86	0.855	1.811×10^{-5}
24	0.86	0.86	0.84	0.82	0.89	0.86	0.81	0.85	0.84	0.85	0.846	1.557×10^{-5}
25	1.02	0.99	1.01	1.03	0.99	1.01	1.03	1.06	1.02	1.04	1.032	2.424×10^{-4}
26	1.06	1.04	1.02	1.04	1.06	1.02	1.06	1.01	1.02	1.04	1.033	1.733×10^{-4}
27	1.02	1.01	0.99	0.99	1.03	1.02	1.02	1.02	1.01	0.99	1.008	1.287×10^{-4}

Таблиця 5.5 – Значення коефіцієнтів рівнянь регресії

Коеф.	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Значення	0,867	0,0015	0,235	-0,0058	-0,00625	-0,00975	-0,008	0,004	-0,064	-0,0075

Усі коефіцієнти рівняння регресії (5.23) є значущими.

У натуральних величинах після перетворення та спрощення виразів рівняння регресії (5.24) представлено в такому вигляді:

$$b_{(S_{o,i}, F_{d,i}, f_{in,i})} = 0,0261 + 9,5 \cdot 10^{-3} S_{o,i} + 2,6287 \cdot 10^{-3} F_{d,i} + 1,389 \cdot 10^{-4} f_{in,i} - 3,125 \cdot 10^{-5} S_{o,i} F_{d,i} - 1,95 \cdot 10^{-5} S_{o,i} f_{in,i} - 8 \cdot 10^{-8} F_{d,i} f_{in,i} + 4 \cdot 10^{-3} S_{o,i}^2 - 1,6 \cdot 10^{-6} F_{d,i}^2 - 3 \cdot 10^{-8} f_{in,i}^2. \quad (5.24)$$

Одержані рівняння регресії (5.23) та (5.24) можуть бути використані для прогнозування ширини канавки залежно від зміни осьового кроку нерівностей $S_{o,i}$, зусилля деформування $F_{d,i}$ та швидкості подачі $f_{in,i}$, у таких межах зміни вхідних факторів: $2 \leq S_{o,i} \leq 4$ (мм); $200 \leq F_{d,i} \leq 600$ (Н); $500 \leq f_{in,i} \leq 1500$ (мм/хв). Графічні значення результатів залежності ширина канавки, одержаного з використанням програмного забезпечення MathCAD, наведено на рис. 5.6 – 5.8.

Аналізували залежності ширини сформованої канавки від осьової відстані, зусилля деформування і швидкості подачі показують, що визначальним параметром є зусилля деформування, зростання якого на всьому діапазоні значень експериментальних досліджень призводило до монотонного нелінійного збільшення ширини сформованої канавки.

Швидкість подачі інструменту чинила суттєвий вплив на ширину сформованої канавки лише в діапазоні значень $S_{o,i} < 3.5$ мм і лише при максимальному для даного експерименту зусиллі деформування $F_{d,i} = 600$ Н.

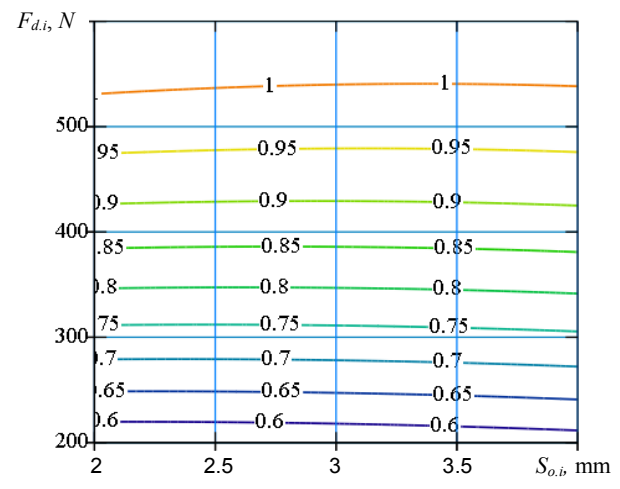
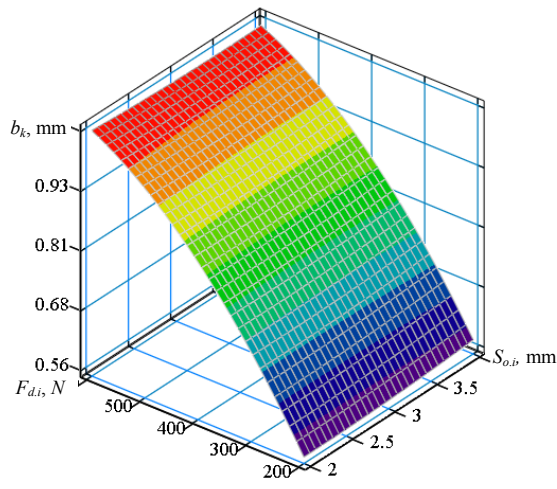


Рисунок 5.6 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності ширини канавки від зміни осьового кроку нерівностей $S_{o,i}$ та зусилля деформування $F_{d,i}$ ($f_{in,i} = 1000$ мм/хв)

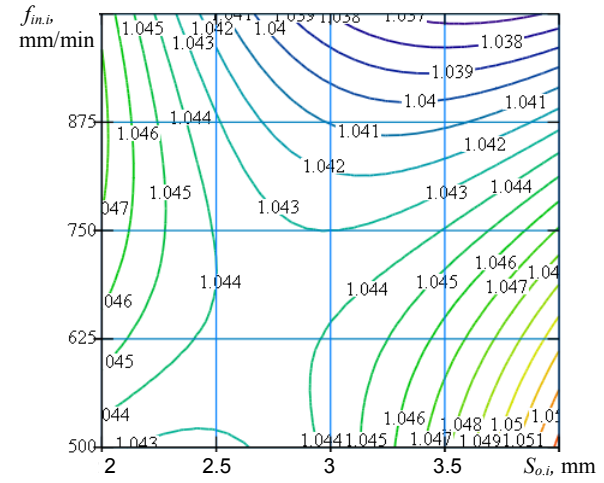
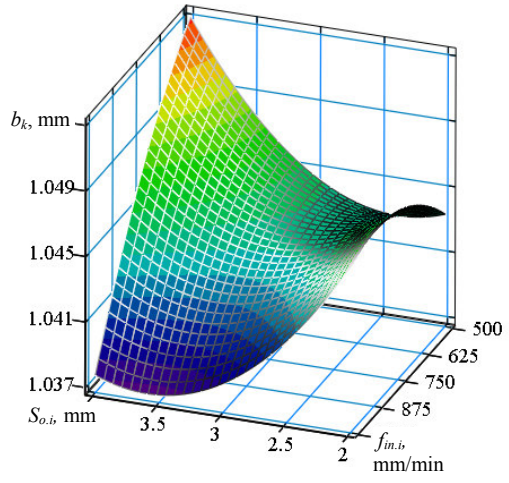


Рисунок 5.7 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності ширини канавки від зміни осьового кроку нерівностей $S_{o,i}$ та швидкості подачі $f_{in,i}$ ($F_{d,i} = 600$ Н)

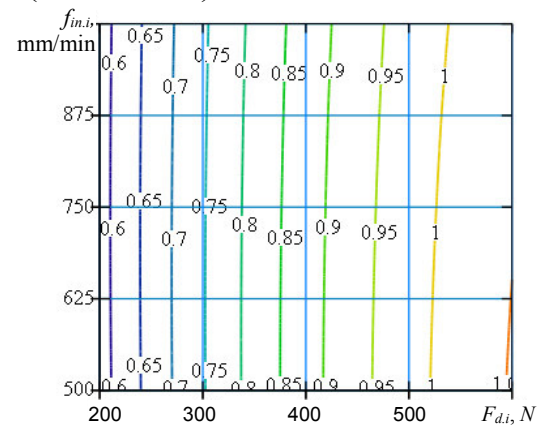
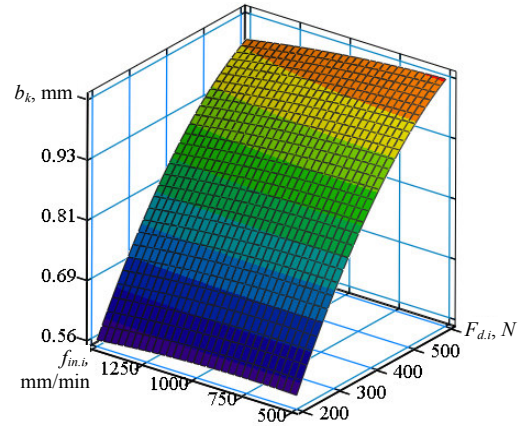


Рисунок 5.8 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності ширини канавки від зміни зусилля деформування $F_{d,i}$ та швидкості подачі $f_{in,i}$ ($S_{o,i} = 4$ мм)

5.4 Дослідження шорсткості поверхні з регулярними мікрорельєфами

Шорсткість поверхні, як вже зазначалось є параметром, за яким оцінюють якість поверхні після виконання технологічних операцій. Після формуванням частково регулярних мікрорельєфів на поверхні дослідного зразка (рис. 5.4) шорсткість поверхні суттєво зменшилась. Вихідна шорсткість поверхні дослідного зразка становила $R_a = 16$ мкм. Досліджувався вплив режимів формування ЧРМ на величину шорсткості поверхні при рівнях варіювання змінних факторів, які наведені у таблиці 5.1. Фактори обирались шляхом експертних оцінок за результатами аналізу наукової літератури.

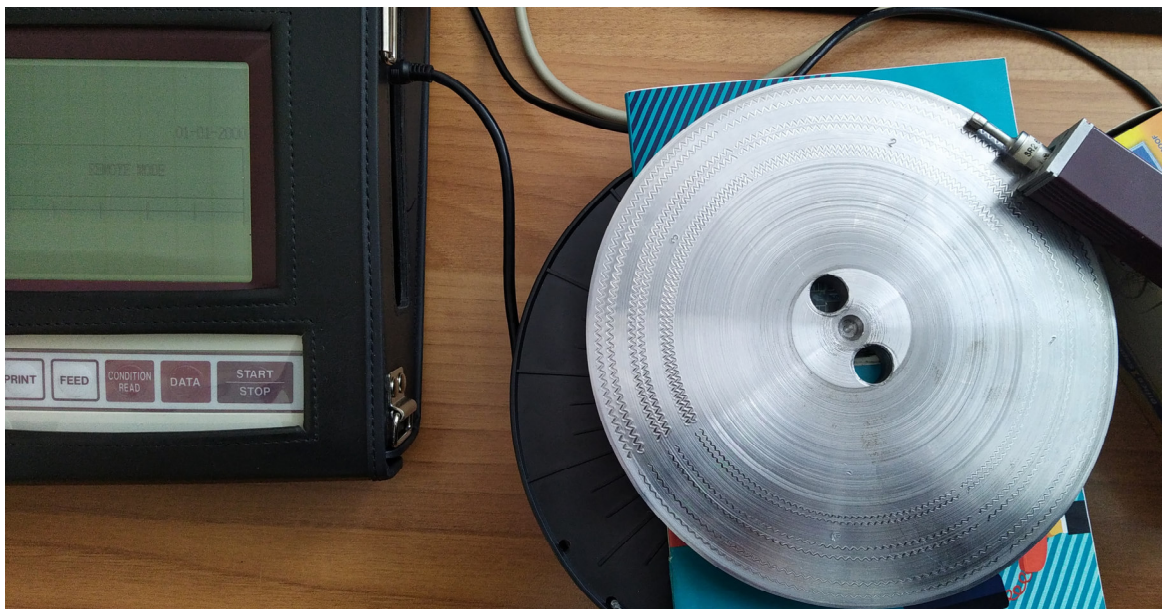


Рисунок 5.9 – Процес заміру шорсткості поверхні із сформованим частково регулярним мікрорельєфом

Шорсткість поверхні заміряли приладом Surface Roughness Tester - Mitutoyo, SurfTest SJ-301. Даний прилад визначає параметри шорсткості R_a та R_z , при цьому базова довжина траси вимірювання становила 2,5 мм.

При порівняльному аналізі використовували параметр шорсткості R_a , як більш інформативніший, оскільки він оцінює параметр шорсткості на всій базовій довжині профілю. Крім цього прилад забезпечує отримання профілограми профілю поверхні, яку можна використовувати для оцінки її

експлуатаційних властивостей за допомогою параметрів кривої Аббота-Фаєрстоуна. Деякі із отриманих профілограм наведені на рис. 5.10.

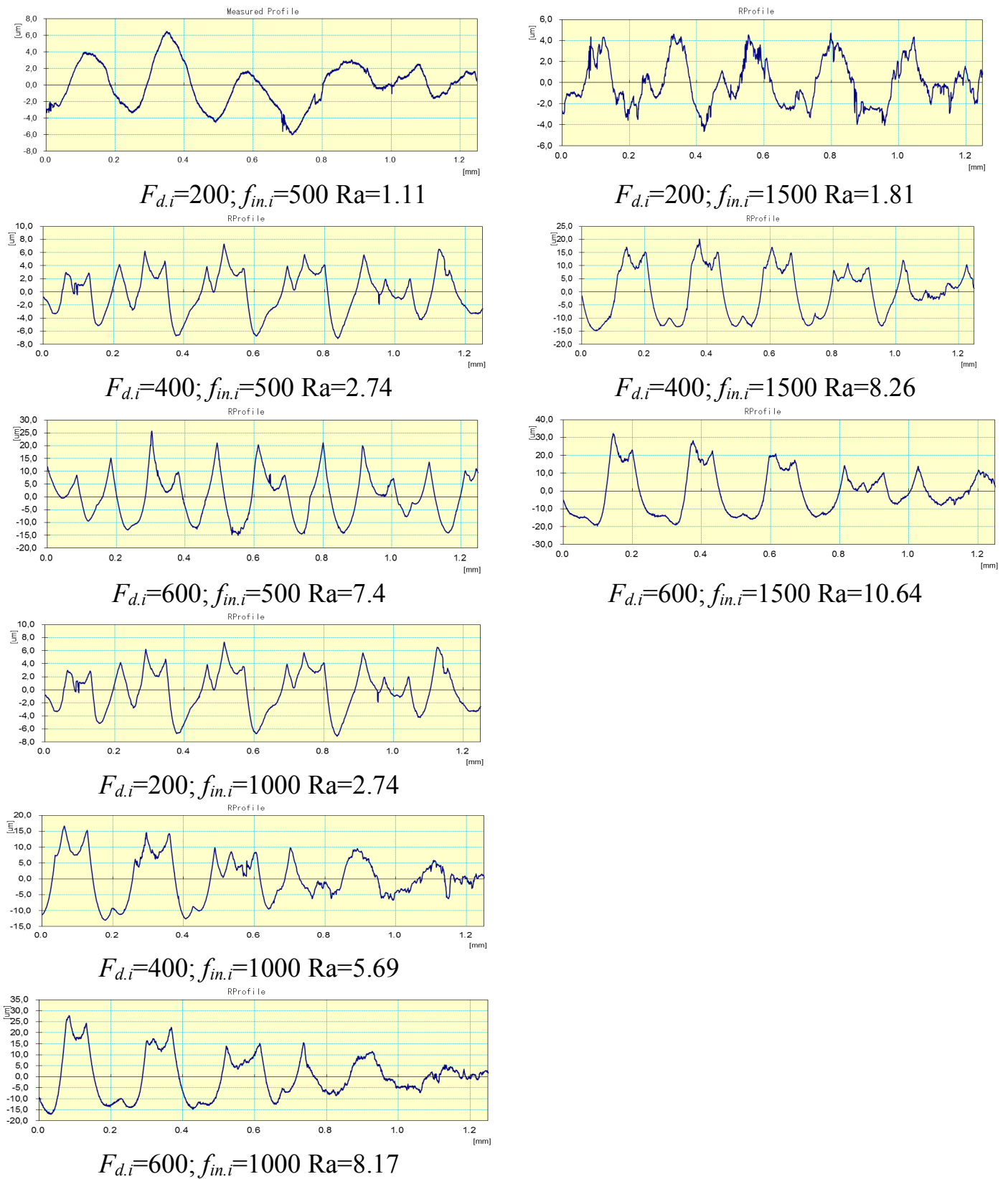


Рисунок 5.10 – Профілограми торцевої поверхні деталей класу «тіла обертання» із сформованим мікрорельєфом

За результатом аналізу числових значень параметрів шорсткості R_a встановлено, що величина осьового кроку взагалі не впливає на цей параметр. Тож в подальшому розглядали лише вплив подачі інструменту на сили деформування на величину параметра шорсткості.

Оптимальною величиною параметра шорсткості R_a для поверхонь, які працюють у спряженні складає 0,63-1,0 мкм. Отже заданому діапазону значень відповідає значення параметра шорсткості отримане при наступних режимах оброблення: $F_{d,i}=200$ Н; $f_{in,i}=500$ мм/хв.

Збільшення сили деформування від 200 до 600 Н призводить до суттєвого зростання параметра шорсткості поверхні R_a від 1,1 до 10,6 мкм. (рис. 5.10). Збільшення ж подачі інструменту від 500 до 1500 мм/хв також призводить до збільшення шорсткості поверхні від 1,1 до 1,81 мкм, однак це зростання є не таким різким і, в окремих випадках, може розглядатись як спосіб для суттєвого підвищення продуктивності праці на операції формування частково регулярних мікрорельєфів.

Тож оптимальною структурою технологічних операцій для торцевих поверхонь тіл обертання є токарна обробка (чорнова та чистова) із забезпеченням висотного параметра шорсткості $R_a=2,5$ мкм., з подальшим гартуванням і чистовим шліфуванням до $R_a=1,25$ мкм. та формуванням частково регулярного мікрорельєфу. При цьому шорсткість поверхні із частково регулярним мікрорельєфом зменшиться до $R_a=1,0$ мкм.

5.5 Висновки до п'ятого розділу

1. За допомогою розроблених математичних моделей розроблено програми в середовищі MathCAD для розрахунку координат опорних точок частково регулярного мікрорельєфу, який було сформовано на торцевих поверхнях тіл обертання за допомогою фрезерного верстату з ЧПК ТМ-1 з різними режимами формування безвібраційним методом.

2. Базуючись на результатах повнофакторного експерименту встановлено вплив зусилля деформування, швидкості подачі та осьового кроку канавок на середнє значення ширини канавки сформованого частково регулярного мікрорельєфу, сформованого на торцевій поверхні деталей класу «тіла обертання». Отримані регресійні залежності, поверхні відгуку та двомірні їх перерізи, які описують вплив цих параметрів на ширину канавки, в межах встановлених при проведенні експерименту, рівнів варіювання змінних факторів.

3. Встановлено вплив режимів формування частково регулярних мікрорельєфів на величину висотного параметра шорсткості поверхні R_a та форму профілю поверхні. Оптимальними режимами з точки зору забезпечення висотного параметра шорсткості поверхні $R_a=1,1$ мкм. є сила деформування $F_{d,i}=200$ Н, подача інструменту $f_{in,i}=500$ мм/хв. Для збільшення продуктивності праці на операції формування частково регулярних мікрорельєфів доцільно збільшувати подачу інструменту від 500 до 1500 мм/хв., що дозволить забезпечити значення параметра шорсткості поверхні $R_a=1,81$ мкм.

4. Тож оптимальною структурою технологічних операцій для торцевих поверхонь тіл обертання є токарна обробка (чорнова та чистова) із забезпеченням висотного параметра шорсткості $R_a=2,5$ мкм., з подальшим гартуванням і чистовим шліфуванням до $R_a=1,25$ мкм. та формуванням частково регулярного мікрорельєфу. При цьому шорсткість поверхні із частково регулярним мікрорельєфом зменшиться до $R_a=1,0$ мкм.

Розділ 6

ПРОЕКТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ

6.1 Розрахунок параметрів дворіцевої адаптивної розточувальної ГОЛОВКИ

Інтенсифікація режимів функціонування сучасних машин з одночасним ускладненням умов їх експлуатації ставить необхідність значного підвищення якості поверхонь деталей, які є виконавчими органами цих машин. В першу чергу це стосується довгомірних внутрішніх циліндричних поверхонь сформованих розточуванням з використанням спеціального інструментального оснащення, зокрема розточувальних інструментів.

При цьому однією з найважливіших проблем у забезпеченні високої якості таких поверхонь є забезпечення постійності показників якості, зокрема шорсткості і точності по всій довжині отворів, особливо у деталях з не перпендикулярним до осі отвору торцем. Ця проблема, у певній мірі, вирішується використанням запропонованого інструментального оснащення, що безперечно є актуальним.

Обробка отворів самоустановлювальними інструментами внаслідок великої їх жорсткості виключає чи суттєво знижує вплив факторів, які викликають похибку розміру, а саме: геометричні неточності верстата та пристосувань, похибки базування оброблюваної деталі та інструменту, податливість технологічної системи, нестабільність механічних властивостей оброблюваного матеріалу, тощо [190, 198, 155].

В роботі [94] розглянуто умови самовстановлюваності плаваючих різцевих блоків в комбінованому інструменті при обробленні отворів на трубозточувальних верстатах. Інструмент із інструментальним блоком та пружними зв'язками, який забезпечує самовстановлення в перехідних процесах, дозволяє розглядати розточування отвору як неперервний процес, що

дає можливість не зменшувати режими різання при обробленні отвору в процесі врізання інструменту зі сторони не перпендикулярного торця деталі, а також отримати високу якість обробленої поверхні без додаткового використання спеціальних інструментів, які використовують для отримання отворів високої точності [100].

Найбільш перспективним методом усунення неспіввісності осей інструменту та заготовки при обробленні отворів є використання самовстановлювальних інструментів, з яких найбільш технологічними є плаваючі дволезові блоки [100].

Також в роботі [100] наведено умови збереження та втрати рівноваги при обробці отворів самовстановлювальними інструментами, зокрема розглянуто схеми дії сил, що діють на дволезовий інструмент при розточування отвору.

Визначенню оптимальних конструктивних параметрів самовстановлювальних інструментів присвячені роботи [197, 180]. Однак при аналізі літературних та патентних джерел не було виявлено технічних рішень, зокрема інструментів для розточування, які б дозволяють керувати точністю обробки внутрішніх циліндричних поверхонь при їх обробленні.

Метою даного дослідження є розроблення конструкції прогресивної дворізевої адаптивної розточувальної головки та методики налаштування її на задану точність оброблення. Прогресивна дворізева адаптивна розточувальна головка (рис. 6.1) складається з корпусу 1 у вигляді кронштейна, з хвостовиком 29, на якому виконана різева поверхня 27 і конічна поверхня 29 з одного боку і U-подібні виступи 30 і 36 з іншого, які паралельні осі хвостовика 28. В U-подібних виступах 30, 36 виконані співвісні отвори 32 і 33 у яких встановлена вісь 35, що зафіксована гайкою 34. На цій осі 35, з можливістю повороту, у паз 5 встановлений рівноплечий важіль 10, на кінцях якого закріплені швидкозмінні твердосплавні різальні елементи 9 і 19.

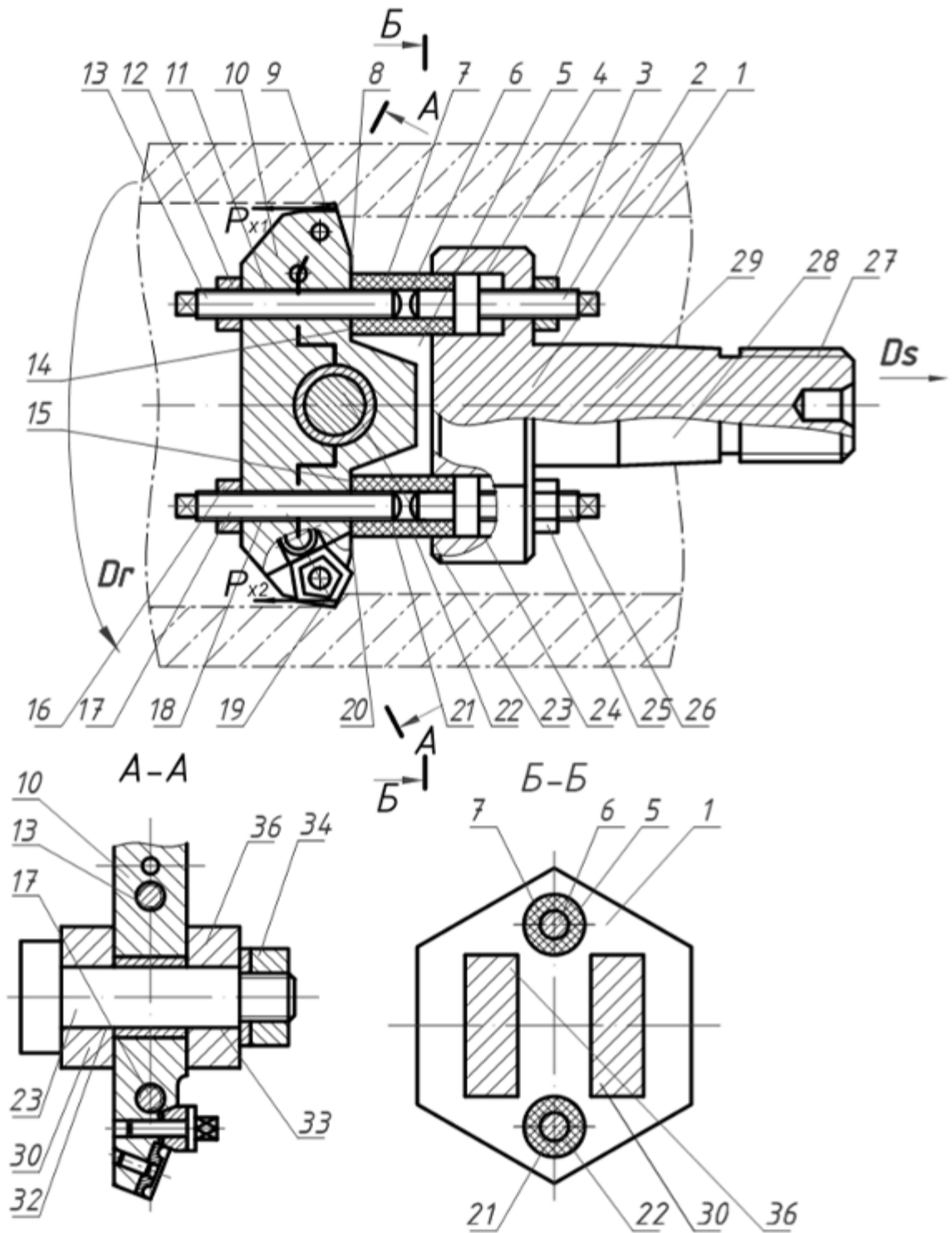


Рисунок 6.1 – Конструкція прогресивної дворізцевої адаптивної розточувальної головки [129]

У корпусі 1, в діаметрально-протилежних напрямках, паралельно U-подібним бічним виступами 30 і 36, напроти рівноплечого важеля 10 виконані два ступінчасті отвори 4 і 24, в яких розміщені упорні гвинти 2 і 26 довжиною

більшою довжини отворів 4 і 24 і з сторони хвостовика ці упорні гвинти зафіксовані гайками 3 і 25. У рівноплечому важелі 10, співвісно із ступінчастими отворами 4 і 24, виконані наскрізні різеві отвори 11 і 18 у які загвинчені регулювальні гвинти 13 і 17.

Для зменшення дії ударних навантажень на упорних та регулювальних гвинтах, що можуть виникати при врізанні ріжучих елементів в тіло заготовки доцільно використовувати пружні демпфери.

У ступенях більшого діаметра ступінчатих отворів 4 і 24 встановлені пустотілі циліндричні пружні демпфери 7 і 21, які своїми внутрішніми циліндричними поверхнями 6 і 22 спряжені з одного боку з упорними ступінчастими гвинтами 2 і 26, а з другого боку з регулювальними гвинтами 13 і 17.

Довжина регулювальних гвинтів 13, 17 більша від довжини наскрізних різевих отворів 11, 18 виконаних у рівноплечому важелі 10. На кінцях упорних і регулювальних гвинтів 2, 26 і 13, 17, що розміщені у пружних демпферах 7 і 21 виконані сферичні поверхні, радіус яких r не менший від величини

$$r \geq \sqrt{\frac{10 \cdot C_p \cdot t^{x_{py}} \cdot s^{y_{py}} \cdot K}{0,785 \cdot [\sigma]_{зм}}}, \quad (6.1)$$

де C_p – коефіцієнт пропорційності у емпіричній формулі для визначення складової P_x ;

t – глибина різання, мм;

x_{px}, y_{px} – показники степенів, які характеризують вплив глибини різання і подачі складову P_x ;

s – подача, мм/об;

K – поправочний коефіцієнт;

$[\sigma]_{зм}$ – допустиме зусилля зминання матеріалу гвинтів, МПа.

Лівими торцями пружні демпфери 7 і 21 оперті на плоскі поверхні 8 і 20

рівноплечого важеля 10.

Перед використанням прогресивної дворіцевої адаптивної розточувальної головки здійснюють її налагодження. Попередньо за встановленими елементами режиму різання (глибиною, подачею і швидкістю різання) з врахуванням фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, використовуючи відомі емпіричні формули, визначають розрахункову величину осьової складової сили різання – P_x . Експериментально визначають середню жорсткість c_{np} окремих пружних демпферів навантажуючи їх осьовою змінною відомою силою F_{oi} і вимірюючи при цьому величину пружної деформації Δ_{npi} , за формулою:

$$c_{np} = \left(\frac{F_{01}}{\Delta_{np1}} + \frac{F_{02}}{\Delta_{np2}} + \dots + \frac{F_{0n}}{\Delta_{npn}} \right) \frac{1}{n}, \quad (6.2)$$

де $F_{01} < F_{02} < \dots < F_{0n}$ – значення осьових зусиль, які прикладені до пружних демпферів;

$\Delta_{np1}, \Delta_{np2}, \dots, \Delta_{npn}$ – значення величин деформацій від прикладання відповідних осьових зусиль;

n – кількість значень осьових зусиль які прикладаються до кожного із пружних демпферів.

Встановлюють і закріплюють, загвинчуючи прогресивну дворіцеву адаптивну розточувальну головку її різивою поверхнею 27 у різевий отвір оправки для закріплення у різцетримачі токарного верстата і одночасно з тим базуючи її по конічній поверхні 28. Загвинчують попередньо упорні ступінчасті гвинти 2 і 26 і деформують пружні демпфери 7 і 21 створюючи при цьому зусилля на кожному демпфері величиною $(0,3-0,5)P_x$. На супорті верстата встановлюють мікроскоп, в окулярі оптичної системи якого розміщена Декартова система координат. Мікроскоп встановлюють так, щоб вертикальна вісь співпадала з горизонтальною твірною U-подібних бічних виступів 30 і 36, а вертикальна вісь співпадала з вершинами швидкозмінних твердосплавних

різальних елементів. У випадку, коли вершини швидкозмінних твердосплавних різальних елементів не співпадають з вертикальною віссю шкали, догвинчуванням відповідних упорних ступінчастих гвинтів 2 або 26 добиваються співпадання вершин різальних елементів з вертикальною віссю Декартової системи координат.

Положення упорних ступінчастих гвинтів 2 і 26 зафіксують гайками 3 і 25. В подальшому загвинчують регулювальні гвинти 13 і 17 до контакту їх сферичних поверхонь з сферичними поверхнями упорних ступінчастих гвинтів 2 і 26 зафіксованих гайками 3 і 25. Знаючи крок різі t_p на регулювальних гвинтах 13 і 17 і маючи розрахункову величину Δ , ці регулювальні гвинти відгвинчують на кут θ із наступною їх фіксацією, який визначається із залежності: $\theta = 360 \cdot \Delta / t_p$, град.

Для випадку, коли поля допусків отворів розміщені у системі отвору «Н» величину Δ , визначимо скориставшись розрахунковою схемою поданою на рис. 2. Необхідно відзначити те, що розрахункова схема подана на рис. 6.2 справедлива для випадків, коли відхилення діаметра обробленої внутрішньої циліндричної поверхні можуть бути розміщені за іншими схемами розміщення полів допусків, наприклад P, Js, D .

При цьому прийняте допущення, що при взаємодії упорних та регулювальних гвинтів головки їх пружні деформації достатньо малі і тому їх не враховують;

Взаємні положення упорних і регулювальних гвинтів та величину Δ зазору між ними у положенні визначали з розрахункової схеми (рис. 6.2).

У загальному, використавши позначення $A_0O_1 = a$, $O_1C = FO_3 = r$; $AO_3 = X_{O_3}$ отримаємо $\Delta = X_{O_3} - (a + 2r)$.

Таким чином, для визначення величини Δ , як параметра налаштування прогресивної дворізцевої адаптивної розточувальної головки, необхідно знайти величину X_{O_3} .

Координати точки O_3 знайдемо як координати точки перетину кола з

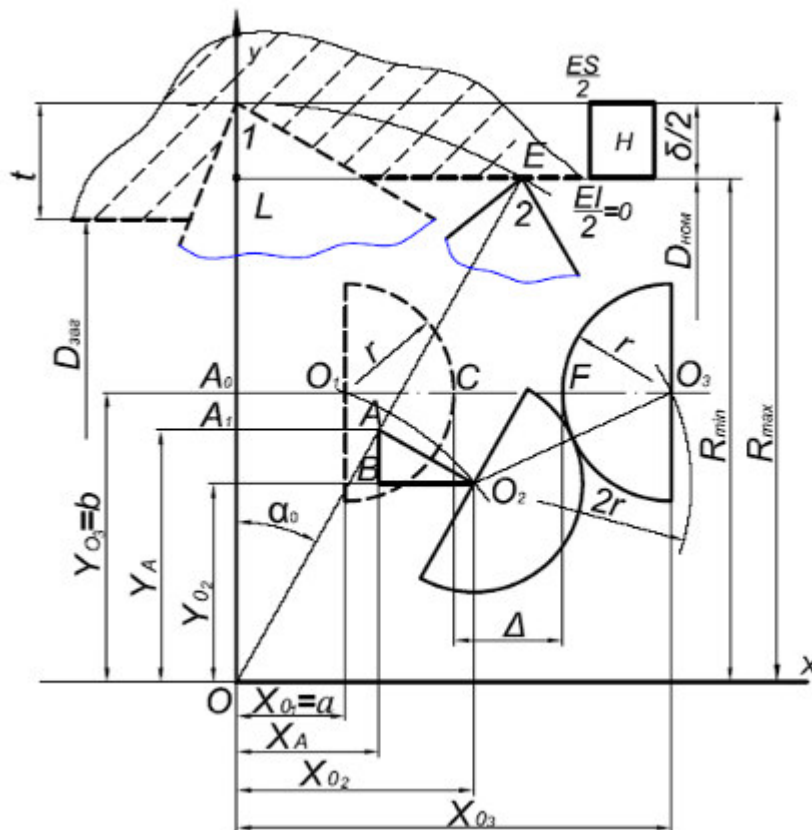
радіусом $2r$ з центром в т. O_2 з прямою A_0O_3 .

Для того, щоб записати рівняння кола з радіусом r і центром у точці O_2 , визначались координати точки O_2 . Спочатку знайдемо величину кута α_0 .

$$\text{Розглянемо } \triangle OLE; OE=R_{max}; OL = R_{min} = R_{max} - \frac{\delta}{2}.$$

$$\text{Звідки } \cos \alpha_0 = \frac{2 \cdot R_{max} - \delta}{2 \cdot R_{max}} = 1 - \frac{\delta}{2 \cdot R_{max}},$$

де R_{max} – максимально допустимий радіус обробленої циліндричної поверхні;
 δ – допуск відповідного квалітету на діаметр обробленої поверхні, мм. δ визначається як $ES-EI$, де ES – верхнє граничне відхилення, мм, а EI – нижнє граничне відхилення, мм.



1 – початкове положення вершини різця; 2 – максимально можливе кінцеве положення вершини різця

Рисунок 6.2 – Розрахункова схема для визначення величини зазору Δ між упорними і регулювальними гвинтами прогресивної дворізцевої розточувальної ГОЛОВКИ

Відповідно

$$\alpha_0 = \arccos\left(1 - \frac{\delta}{2 \cdot R_{\max}}\right) \quad (6.3)$$

Використавши властивості обернених тригонометричних функцій, можемо записати

$$\sin \alpha_0 = \sin\left[\arccos\left(1 - \frac{\delta}{2 \cdot R_{\max}}\right)\right]. \quad (6.4)$$

Звідки отримаємо

$$\alpha_0 = \arcsin\sqrt{4\delta \cdot R_{\max} - \delta^2} / 2R_{\max}, \quad (6.5)$$

З $\triangle OA_1A$ з врахуванням того, що $AO = A_0O$ і прийнявши, що $OA_0 = b$, отримаємо координати точки А: абсцису $X_A = b\sqrt{4\delta \cdot R_{\max} - \delta^2} / 2R_{\max}$; ординату $Y_A = b(1 - \delta / 2R_{\max})$.

Розглянувши $\triangle ABO_2$, визначимо координати X_{O_2} і Y_{O_2} центра кола, який розміщений у т. O_2 з радіусом r_k і скориставшись $\triangle ABO_2$ після спрощень, отримаємо в системі координат XOY :

$$X_{O_2} = \frac{b\sqrt{4 \cdot \delta \cdot R_{\max} - \delta^2} + 2aR_{\max} - \delta \cdot a}{2 \cdot R_{\max}}, \quad (6.6)$$

$$Y_{O_2} = \frac{2 \cdot b \cdot R_{\max} - \delta \cdot b - a\sqrt{4 \cdot \delta \cdot R_{\max} - \delta^2}}{2 \cdot R_{\max}}, \quad (6.7)$$

Тоді рівняння кола з центром в т. O_3 і її координатами X_{O_3} і Y_{O_3}

виразяться формулою:

$$R_k^2 = (2r)^2 = (b - Y_{O2})^2 + (X_{O3} - X_{O2})^2. \quad (6.8)$$

Здійснивши заміну

$$c = X_{O2}^2 + b^2 - 2bY_{O2} + Y_{O2}^2 - 4r^2 \quad (6.9)$$

і спростивши рівняння (6.9) будемо мати

$$X_{O3} = X_{O2} \pm \sqrt{-b^2 + 2bY_{O2} - Y_{O2}^2 + 4r^2} \quad (6.10)$$

Виразивши у рівняннях (6.6) і (6.7) R_{max} через $(D_{НОМ} + ES)/2$ отримаємо

$$X_{O2} = \frac{b\sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta^2} + a \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta \cdot a}{D_{НОМ} + ES}; \quad (6.11)$$

$$Y_{O2} = \frac{-a\sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta^2} + b \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta \cdot b}{D_{НОМ} + ES}. \quad (6.12)$$

Підставивши (6.11) і (6.12) у рівняння (6.10) після спрощення будемо мати

$$X_{O3} = \frac{b\sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta^2} + a \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta \cdot a}{D_{НОМ} + ES} + \sqrt{-b^2 + 2 \cdot b \left(\frac{b \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta \cdot b - a\sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta^2}}{D_{НОМ} + ES} \right)} \quad (6.13)$$

$$- \sqrt{\left(\frac{b \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta \cdot b - a \sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta^2}}{D_{\text{НОМ}} + ES} \right)^2 + 4r^2}.$$

Оскільки $\Delta = XO_3 - (a + 2r)$, то

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{b \sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta^2} + a \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta \cdot a}{D_{\text{НОМ}} + ES} + \\ & + \sqrt{-b^2 + 2 \cdot b \left(\frac{b \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta \cdot b - a \sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta^2}}{D_{\text{НОМ}} + ES} \right) -} \quad (6.14) \\ & - \sqrt{\left(\frac{b \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta \cdot b - a \sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta^2}}{D_{\text{НОМ}} + ES} \right)^2 + 4r^2} - (a + 2r). \end{aligned}$$

Отримана залежність дозволяє визначити відстань між упорними і регулювальними гвинтами розточувальної головки, що забезпечить рух вершин різальних елементів в межах заданого поля допуску, тобто задану точність оброблення внутрішньої циліндричної поверхні отвору.

Для побудови графічних залежностей значення Δ від номінального діаметра D оброблюваної заготовки для різних квалітетів точності прийнято наступні значення конструктивних параметрів розточувальної головки $a=D/10$; $b_1=D/4$; $b_2=7D/16$; $r=6$.

Таблиця 6.1 – Значення величини Δ для 7 квалітету

інтервал номінальних розмірів, мм	Граничні відхилення полів допусків та відповідне їх значення Δ							
	P7		Js7		H7		D7	
50	-0,021	0,428	+0,015		+0,030	0,429	+0,130	0,429
80	-0,051	0,542	-0,015		0	0,543	+0,100	0,543
80	-0,024	0,585	+0,017		+0,035	0,586	+0,155	0,586
120	-0,059	0,717	-0,017		0	0,717	+0,120	0,718
120	-0,028	0,766	+0,020		+0,040	0,766	+0,185	0,767
180	-0,068	0,938	-0,020		0	0,938	+0,145	0,939
180	-0,033	1,005	+0,023		+0,046	1,005	+0,216	1,006
250	-0,079	1,184	-0,023		0	1,184	+0,170	1,185
250	-0,036	1,258	+0,026		+0,052	1,258	+0,242	1,259
315	-0,088	1,411	-0,026		0	1,411	+0,190	1,412
315	-0,041	1,476	+0,028		+0,057	1,477	+0,267	1,477
400	-0,098	1,662	-0,028		0	1,663	+0,210	1,663
400	-0,045	1,746	+0,031		+0,063	1,746	+0,293	1,747
500	-0,0108	1,951	-0,031		0	1,951	+0,230	1,951

інтервал номінальних розмірів, мм	Граничні відхилення полів допусків та відповідне їх значення Δ							
	H6	Δ , мм	H7	Δ , мм	H8	Δ , мм	H9	Δ , мм
50	+0,019	0,342	+0,030	0,428	+0,046	0,529	+0,074	0,668
80	0	0,433	0	0,542	0	0,670	0	0,847
80	+0,022	0,465	+0,035	0,585	+0,054	0,725	+0,087	0,917
120	0	0,570	0	0,717	0	0,888	0	1,124
120	+0,025	0,607	+0,040	0,766	+0,063	0,959	+0,100	1,203
180	0	0,744	0	0,938	0	1,174	0	1,473

180	+ 0,029	0,800	+ 0,046	1,005	+ 0,072	1,254	+ 0,115	1,577
250	0	0,943	0	1,184	0	1,477	0	1,858
250	+ 0,032	0,990	+ 0,052	1,258	+ 0,081	1,565	+ 0,130	1,972
315	0	1,111	0	1,411	0	1,755	0	2,212
315	+ 0,036	1,177	+ 0,057	1,477	+ 0,089	1,838	+ 0,140	2,294
400	0	1,326	0	1,662	0	2,069	0	2,581
400	+ 0,040	1,396	+ 0,063	1,746	+ 0,097	2,158	+ 0,155	2,712
500	0	1,560	0	1,950	0	2,410	0	3,027

За даними розрахунків побудовано графічні залежності (рис. 6.3). Величина Δ залежить від величини поля допуску і не залежить від його розміщення.

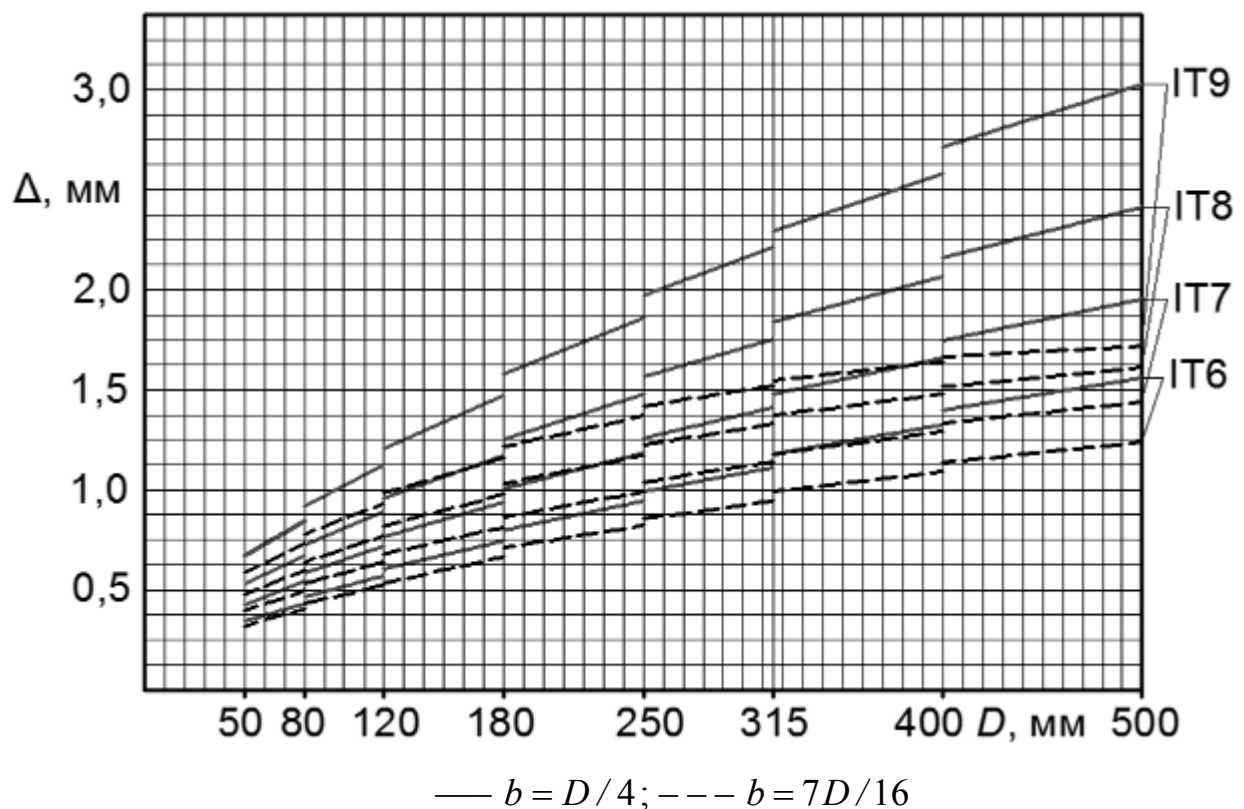


Рисунок 6.3 – Графіки залежності величини Δ від номінального діаметра D внутрішньої циліндричної поверхні оброблюваних отворів при $a = D/10$ та різних квалітетів точності

Після налагодження головки її знімають з оправки. На оправку, яка закріплена у різцетримачі верстата спочатку встановлюють заготовку у вигляді труби. Потім з'єднують головку із оправкою за допомогою різцевої поверхні 27 (рис. 6.3) базуючи по конічній поверхні 29. Після чого заготовку трубу встановлюють у спеціальний кулачковий патрон, встановлюють її і закріплюють.

Налагоджена головка працює наступним чином. Включають обертовий рух заготовки D_r і подачу головки D_s . При однакових осьових складових сил різання, що виникають в процесі різання на першому і другому різальних елементах, тобто $P_{x1}=P_{x2}$, рівноплечий важіль 10 знаходиться статичному нерухомому положенні відносно своєї осі, тобто у рівновазі.

У випадку, коли рівновага порушується, тобто $P_{x1} \neq P_{x2}$, і наприклад, $P_{x1} > P_{x2}$ і коли на різальному елементі 9 (рис. 6.1) сила P_x більша ніж на різальному елементі 19 важіль 10 повертається проти годинникової стрілки, зменшуючи при цьому подачу на різальний елемент 9 і одночасно збільшуючи подачу на різальний елемент 19, забезпечуючи при цьому умову рівноваги $P_{x1} = P_{x2}$.

Якщо ж осьова складова сили різання на другому різці 19 – P_{x2} виявиться більшою ніж P_{x1} , то поворотом рівноплечого важеля у протилежному напрямі забезпечиться умова $P_{x1} = P_{x2}$. Пружні демпфери 7 і 21 гасять коливання осьових складових сил, особливо на етапах вривання і виходу із контакту різців з оброблювальною поверхнею. Якщо, наприклад, різальний елемент 9 відхилився на таку величину, при якій умова рівноваги не може бути забезпечена, рівноплечий важіль 10 повернеться проти годинникової стрілки на певний кут і при цьому вибирається зазор між сферичними поверхнями упорного ступінчастого гвинта 26 і регульовального гвинта 17 і тоді адаптивна головка працюватиме як головка із жорстко закріпленими різцями, забезпечуючи при цьому задану точність. Аналогічна ситуація буде мати місце, коли осьова складова сили різання на різальному елементі 19 буде більша ніж на різальному елементі 9, тобто $P_{x1} < P_{x2}$.

Таким чином, запропонована прогресивна дворіцева адаптивна розточувальна головка забезпечує спрощене налаштування на заданий розмір певного квалітету та можливість використання багатогранних твердосплавних пластин, а в певних умовах дозволяє не втрачати своєї працездатності і працювати як інструмент із жорстко закріпленими різцями, що підвищує надійність роботи.

6.2 Розрахунок конструктивних параметрів інструмента для оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним розкочуванням

Одним із методів підвищення якості внутрішніх циліндричних поверхонь (гідроциліндрів автомобільних кранів, гідроциліндрів механізмів керування муфтами щеплення, циліндрів підсилення механізмів повороту автомобілів, тощо) є поверхневе зміцнення шляхом формування на цих поверхнях регулярних мікрорельєфів.

Тому створення нового типу інструмента для вібраційного обкочування внутрішніх циліндричних поверхонь і методики визначення його конструктивних параметрів є актуальною задачею.

Для забезпечення ефективної роботи інструментів для формування регулярного мікрорельєфу необхідно створити умову при якій матиме місце переважаюче тертя кочення між деформуючим елементом (кулькою) і оброблюваною поверхнею.

Ця умова виконується тоді, коли тертя між кулькою і оброблюваною поверхнею більше ніж тертя між кулькою і поверхнею, на яку вона опирається, тобто

$$F \cdot r_k > F_1 \cdot r_k + F_2 \cdot r_k \text{ або } F \cdot r_k > F_1 \cdot r_k + F_2' \cdot r_k \quad (6.15)$$

де F – сила тертя між кулькою і оброблюваною поверхнею;

F_1 – сила тертя між кулькою і поверхнею опори;

F_1 і F'_2 – сила тертя між кулькою і боковими сторонами сепаратора;

r_k – радіус кульки.

Конструктивно ця умова реалізується шляхом встановлення деформувального елемента на кульковий підшипник, використання бронзових сепараторів і фторопластів як опорних поверхонь.

Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу віброобробчуванням складається з корпусу 1 (рис. 6.4) виконаного у вигляді пустотілого ступінчастого циліндра, у нижній частині якого у його стінках виконані, три рівномірно розміщені по колу наскрізні циліндричні отвори 14, 22, 23, у яких розміщені деформуючі кульки 13, 24, 25, положення яких зафіксовано з одного боку сепаратором 12, а з другого боку конічною поверхнею гостровершинного конуса 15 виконаного на нижній частині осерухомого циліндричного штока 8.

Сепаратор закріплений у нижній частині зовнішньої циліндричної поверхні корпусу 1 при допомозі гайки 11, яка зафіксована контргайкою 10. Осерухомий циліндричний шток з гостровершинним конусом 15 розміщений у внутрішній циліндричній поверхні 7 більшого діаметра корпусу 1 підпружинений вниз пружиною стиску 6, довжина якої обмежена планкою 5 пропущеною через вікна 4 і 18, які виконані у стінці верхньої частини корпусу 1. У центрі планки 5 виконаний наскрізний отвір 19. Через цей отвір 19 і пружину стиску 6 вільно пропущений гвинт 20, який своєю нижньою частиною загвинчений у різевий отвір 16 осерухомого циліндричного штока 8.

Планка 5 обмежена верхньою спеціальною гайкою 3 спряженою з різевою поверхнею 21, розміщеною у верхній частині зовнішньої циліндричної поверхні корпусу 1 і ця гайка 3 зафіксована контргайкою 2. У середній частині різевої поверхні 21 корпусу 1 розміщені нижня регулювальна гайка 17 і контргайка 9.

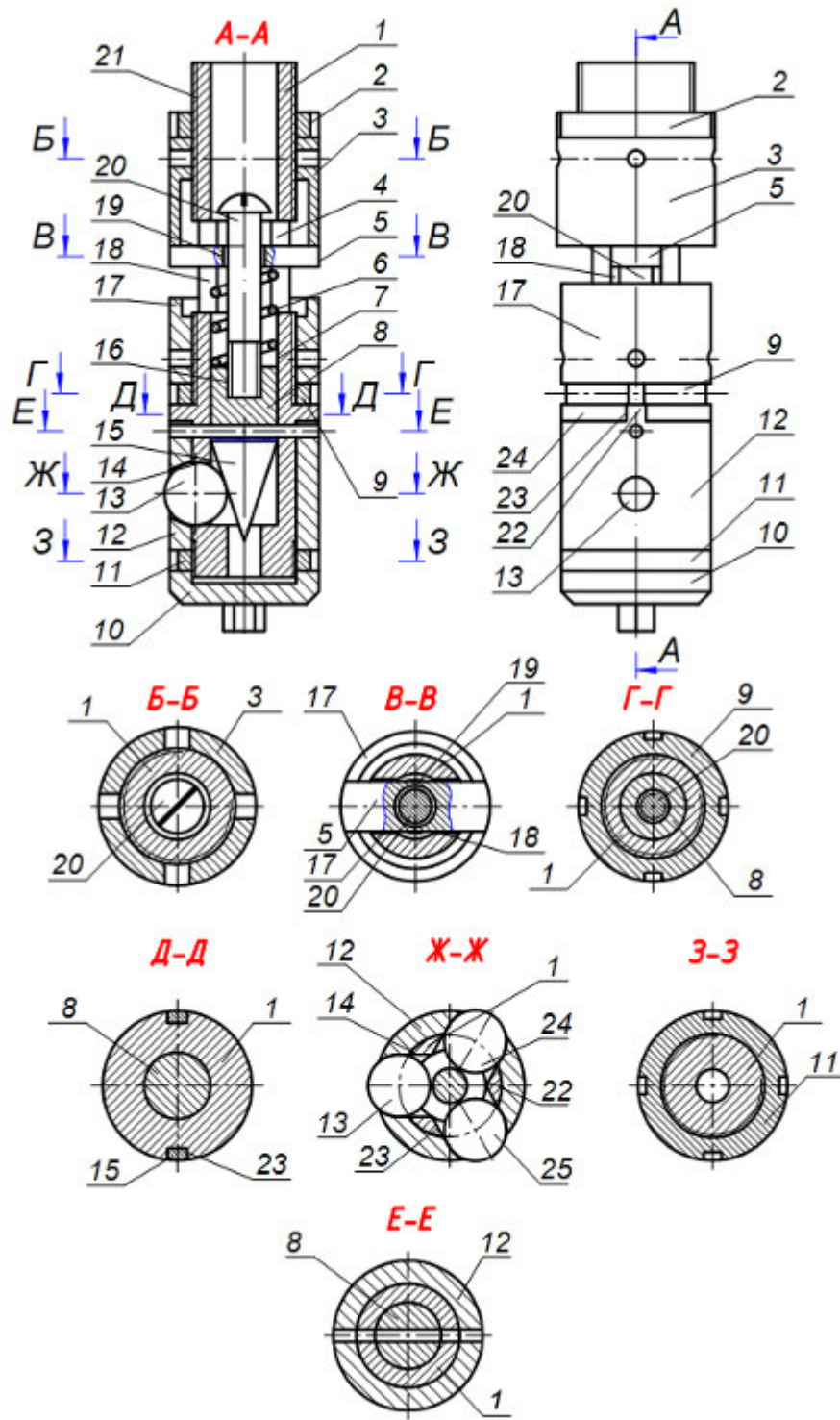


Рисунок 6.4 – Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу віброобробчуванням

Інструмент працює наступним чином. Спочатку здійснюють налаштування інструмента. Для цього використовують спеціальний пристрій для тарування тензOMETричної балки (рис. 6.5).

У боковий отвір 9 корпусу 8, який закріплений на плиті 1 вставляють рухомо шток 6 із сферичними кінцями, радіус сфери якого не менший від радіусу деформуючого елемента – кульки. У центральному отворі 7 корпусу 8 виконаний наскрізний паз 5, у якому за допомогою гвинта 4 закріплена тензометрична балка 3. На підставці 10 розміщено динамометр стиску 11, наприклад ДОСМ 3-01, який з одного боку опертий у сферичну поверхню рухомого штока 6, а з другого боку опертий у сферичний кінець гвинта 12, який загвинчений у різевий отвір 13, що виконаний у стінці 14, жорстко закріпленої на плиті 1. Лівий сферичний кінець рухомого штока 6 моделює деформуючий елемент – кульку інструмента і опертий посередині тензометричної балки 3. Тензометричний давач 2 прикріплений до протилежного боку тензометричної балки 3 і під'єднаний до тензометричної станції (на рис. не показано).

Тарування тензометричного давача 2 здійснюється наступним чином. Загвинчують гвинт 12, вибирають зазори і забезпечують контакт наступних пар: лівий сферичний кінець рухомого штока 6 – тензометрична балка 3; правий кінець рухомого штока 6 – лівий торець 16 динамометра стиску 11; правий торець динамометра стиску 11 – сферичний кінець гвинта 12.

Забезпечують попередній натяг, створивши загвинчуванням гвинта 12 зусилля, наприклад, 0,5 Н. Виставляють рухому шкалу 15 індикатора годинникового типу 11 і стрілку реєструючого приладу, наприклад, міліамперметра (на фіг. не показано) на "нуль".

Поетапно через, наприклад, 5 Н загвинчуванням гвинта 12 створюють зусилля на динамометрі стиску 11 і реєструють відповідні покази міліамперметра. Здійснивши таким чином навантаження до максимального, наприклад до 250 Н, гвинт 12 поетапно відгвинчують, динамометр стиску 13 розвантажують до 0,5 Н і реєструють покази міліамперметра.

Таким чином отримують діаграму навантаження і розвантаження з певним гістерезисом. Для кожного з навантажувальних і розвантажувальних значень динамометра знаходять середнє значення і відповідне йому значення

сили струму в міліамперах.

За отриманими даними будують тарувальний графік у координатах: зусилля, що діє на тензOMETричну балку – сила струму.

У подальшому гвинт 12 відгвинчують, динамометр стиску 11 і підставку 10 забирають, виймають з корпусу 8 рухомий шток 6. У центральний отвір 7 корпусу 8 тарувального пристрою встановлюють інструмент для формування регулярного мікрорельєфу віброобкочуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях так, щоб вершина деформуючого елемента - кульки розміщувалась посередині тензOMETричної балки 3.

Загвинчуючи верхню регулювальну гайку 3 інструмента (рис. 2.9) переміщують планку 5 вниз і деформують при цьому пружину стиску 6 і переміщують осерухомий циліндричний шток 8 з гостровершинним конусом 15 вниз, а кульки 13, 24, 25 переміщують радіально від центра. Деформуючий елемент – кулька 13 (рис. 6.4) діє на тензOMETричну балку 2 (рис. .10) тарувального пристрою і при цьому деформує її а на шкалі міліамперметра фіксують силу струму. Використавши тарувальний графік, деформацією пружини стиску 6 створюють необхідне зусилля віброобкочування, що діятиме зі сторони сферичних поверхонь кульок 13, 22, 24 на оброблювану внутрішню циліндричну поверхню деталі, зафіксувавши по шкалі інструмента вертикальне положення планки 5. Потім верхню регулювальну гайку 3 інструмента відгвинчують, звільнивши при цьому кульки 13, 24, 25 і інструмент, виймають із тарувального пристрою.

У подальшому загвинчують верхню регулювальну гайку 3, до раніше зафіксованого положення і переміщуючи при цьому вниз планку 5 гайку 3 фіксують контргайкою 2 і цим самим завершують налагодження інструмента на задане зусилля для формування регулярного мікрорельєфу віброобкочуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях.

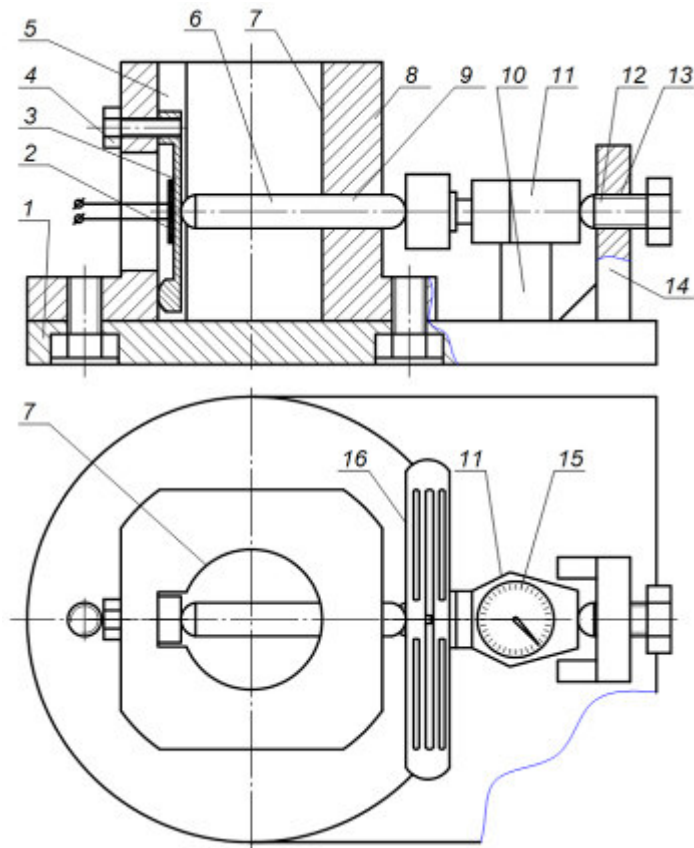


Рисунок 6.5 – Спеціальний пристрій для тарування тензометричної балки

Налагоджений інструмент працює наступним чином. Верхнім кінцем з різцевою поверхнею 21 (рис. 6.4) інструмент для формування регулярного мікрорельєфу віброобкочуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях з'єднують із, наприклад, шпинделем, який має поступальний і осциляційний рухи. Деталь, наприклад, циліндричну втулку встановлюють у патрон цього верстата.

Надаючи обертовий рух (кругову подачу) деталі, а інструменту для формування регулярного мікрорельєфу віброобкочуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях повздовжню подачу і осциляційний рух, підводять інструмент та встановлюють його у циліндричний отвір оброблюваної деталі і здійснюють формування регулярного мікрорельєфу віброобкочуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях.

Після проходження деформуючих елементів - кульок через внутрішню циліндричну поверхню оброблюваної деталі вимикають всі рухи, інструмент від'єднують від шпинделя.

Оброблювану деталь знімають з патрона, встановлюють наступну заготовку і процес повторюють.

Конструктивні параметри інструмента для формування регулярного мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях віброобкочуванням

визначаються із рис. 3 поетапно у такій послідовності.

1. В залежності від величини діаметра D_0 внутрішньої циліндричної оброблюваної поверхні отвору деталі (рис. 6.6) визначають значення діаметрів деформуючих елементів – кульок.

Використавши рисунок 6.6 б можна записати

$$D_0 = 2(K_0O_2 + O_1O_2 + O_1O) \quad (6.16)$$

Врахувавши, що

$K_0O_2 = \frac{d_k}{2}$ і взявши до уваги $\triangle ON_1O$ (рис. 6.6) отримаємо $\angle N_1O_1O = \pi/6$;

$N_1O_1 = d_k/2$, Тоді

$$OO_1 = ON_1 / \cos(\pi/6) = d_k / 2 \cdot \cos(\pi/6). \quad (6.17)$$

Величина $O_1O_2 = NL_1 = M_1K_1$ як протилежні сторони відповідних паралелограмів $NO_1O_2L_1$ і $NL_1M_1K_1$.

Величину M_1K_1 визначимо з $\triangle MM_1K_1$.

$\angle MM_1K_1 = \alpha/2$.

$$O_1O_2 = MM_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2). \quad (6.18)$$

$$O_1O_2 = 0,5 \cdot d_k \left[\frac{\operatorname{ctg}(\alpha/2)}{\cos(\pi/6)} - 1 - \operatorname{ctg}(\alpha/2) \cdot \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right) \right] \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) \quad (6.19)$$

$$MM_1 = FC - KO - OC.$$

Величину FC визначимо з $\triangle MCF$

$$FC = MF \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2).$$

Врахувавши, що $MF = \frac{d_{\kappa}}{2 \cdot \cos(\pi/6)}$, отримаємо

$$FC = \frac{d_{\kappa} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{2 \cdot \cos(\pi/6)}. \quad (6.20)$$

Величину OC визначимо з $\triangle LOC$ (рис. 6.6).

$$OC = LO \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2).$$

У свою чергу

$$LO = OO_1 - O_1L = \frac{d_{\kappa}}{2 \cos(\pi/6)} - \frac{d_{\kappa}}{2 \cos(\alpha/2)} = \frac{d_{\kappa}}{2} \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right) \text{ або}$$

$$LO = \frac{d_{\kappa}}{2} \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right).$$

Тоді величина OC визначається із формули

$$OC = 0,5 \cdot d_{\kappa} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2) \cdot \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right).$$

Оскільки $KO = d_{\kappa}/2$, будемо мати

$$MM_1 = \frac{d_{\kappa} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{2 \cdot \cos(\pi/6)} - \frac{d_{\kappa}}{2} - \frac{d_{\kappa}}{2} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2) \cdot \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right).$$

Спростивши, отримаємо вираз

$$MM_1 = 0,5 \cdot d_{\kappa} \left[\frac{\operatorname{ctg}(\alpha/2)}{\cos(\pi/6)} - 1 - \operatorname{ctg}(\alpha/2) \cdot \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right) \right]. \quad (6.21)$$

Підставивши відповідні значення величин, що входять у праву частину рівняння (6.21) отримаємо

$$D_o = 2 \left\{ \frac{d_k}{2} + \frac{d_k}{2} \cdot \left[\frac{\operatorname{ctg}(\alpha/2)}{\cos(\pi/6)} - 1 - \operatorname{ctg}(\alpha/2) \cdot \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right) \right] \operatorname{tg}(\alpha/2) + \frac{d_k}{2 \cos(\pi/6)} \right\}, \quad (6.22)$$

а після спрощення будемо мати

$$d_k = \frac{D_o \cdot \cos(\alpha/2)}{2,155 \cdot \cos(\alpha/2) + 1 - \sin(\alpha/2)}; \quad (6.23)$$

При умові, що $\alpha=30^\circ$, залежність (6.23) набуде вигляду $d_k = 0,342 \cdot D_o$.

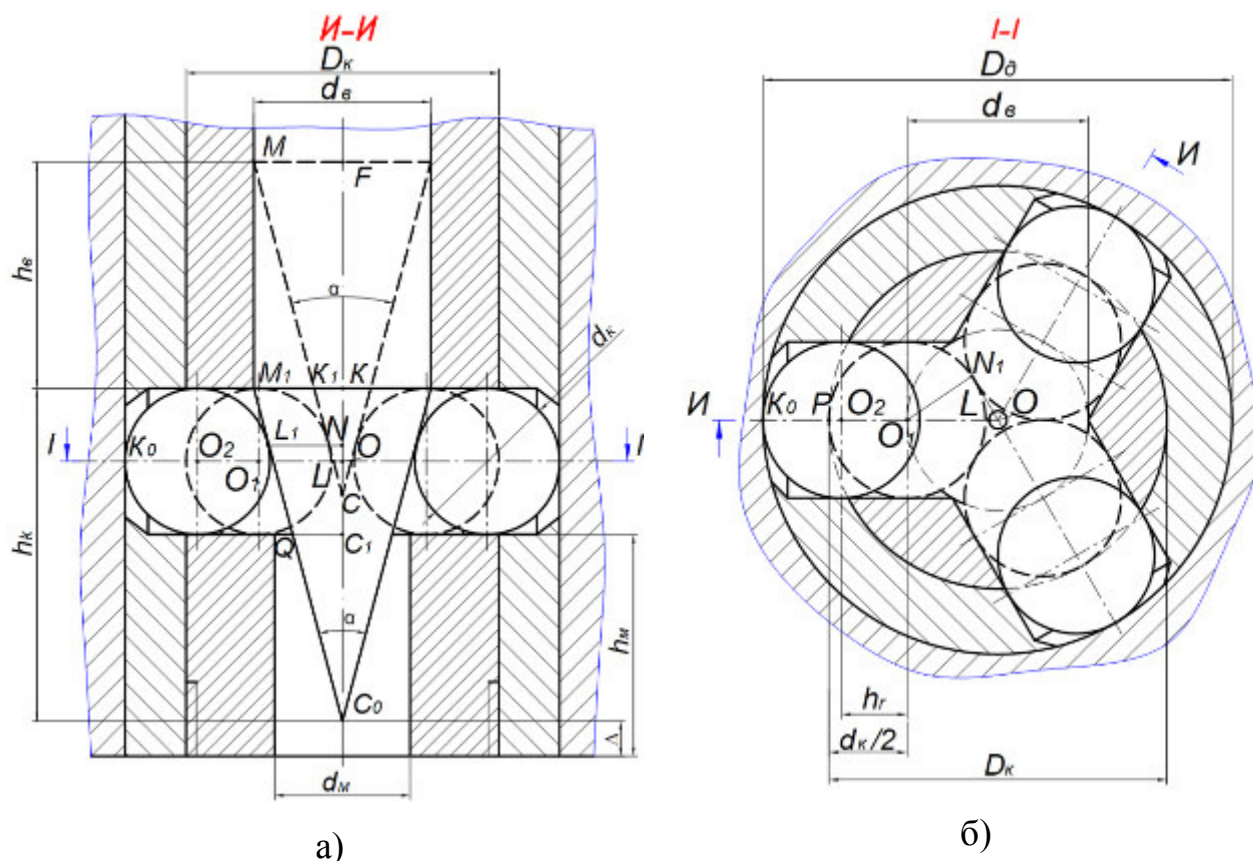


Рисунок 6.6 – Розрахункова схема для визначення конструктивних параметрів інструмента

З рівняння (6.23) запишемо

$$\alpha = 2 \arccos \left(\frac{2 \left(\frac{D_o}{d_k} - 2,155 \right)}{\left(\frac{D_o}{d_k} - 2,155 \right)^2 + 1} \right) \quad (6.24)$$

При визначенні мінімальної величини плоского кута при вершині гостровершинного конуса у січній площині, що проходить через повздовжню вісь штока враховують те, що для забезпечення працездатності інструмента необхідне дотримання умови не самогальмування пари конус-кулька.

Ця умова реалізується тим, що кут між слідом конічної поверхні гостровершинного конуса 9 і слідом циліндричної поверхні осерухомого циліндричного штока 8 (рис. 6.6) у січній площині, що проходить через повздовжню вісь корпусу, повинен бути більшим за кут тертя ковзання, тобто $\alpha / 2 > \arctg \varphi_{mp}$, де φ_{mp} – коефіцієнт тертя ковзання між конічною поверхнею конуса і сферичною поверхнею кульки. За літературними даними приймаємо, що кут $\varphi_{mp} = 0,2$. Тоді $\arctg 0,2 = 11^\circ 19'$.

За даними [111] вибираємо з першого ряду пріоритету найближче більше значення кута – $\alpha / 2 = 15^\circ$.

Встановивши значення кута α в межах $30 \leq \alpha \leq 85$ можемо встановити співвідношення між діаметром оброблюваного отвору та діаметром деформувального елемента (кульки).

Підставивши граничні числові значення кута α у вираз (6.24) та виразивши d_k через D_o знайдемо інтервал значень діаметра деформуючих кульок d_k виражених через діаметр внутрішньої циліндричної поверхні оброблюваного отвору деталі D_o $0,32D_o \geq d_k \geq 0,22D_o$.

При цьому діаметр кульки – d_k вибираємо на основі рекомендацій [269].

2. Визначення величини діаметра D_k зовнішньої циліндричної поверхні корпусу, яка залежить від діаметра d_k деформуєчного елемента - кульки.

Величина зовнішнього діаметра D_k корпусу визначається із умови забезпечення можливості встановлення сепаратора на корпус, коли всі три кульки дотикаються і знаходяться у найближчому від повздовжньої осі корпусу положенні (рис. 6.5).

Ця умова забезпечується наступним. З $\triangle ONO_1$ будемо мати.

$$\angle N_1O_1O = \pi/6; N_1O_1 = d_k/2, \text{ тоді } D_k = 2OP = 2(OO_1 + O_1P).$$

$$OO_1 = ON_1 / \cos(\pi/6) = d_k / 2 \cdot \cos(\pi/6).$$

Тоді

$$D_k = d_k \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos(\pi/6)} \right). \quad (6.25)$$

З врахуванням того, що $\cos(\pi/6) = 0,866$ після спрощення отримаємо $D_k = 2,155 \cdot d_k$.

3. За більший діаметр d_e внутрішньої циліндричної поверхні корпусу приймаємо таке значення, яке дорівнює діаметру кола проведеному у січній площині перпендикулярній повздовжній осі корпусу через центри трьох кульок.

Використавши графічне зображення (рис. 6.6) отримаємо

$$d_e = 2 \cdot O_1O = \frac{d_k}{\cos(\pi/6)} = 1,155 \cdot d_k \quad (6.26)$$

4. Вертикальний хід конуса h_e , при завершенні якого кульки

перемістяться у радіальному напрямі з найближчого положення розміщеного до повздожньої осі корпуса до контакту кульок з оброблюваною внутрішньою циліндричною поверхнею деталі визначимо, скориставшись рис. 2.9.

Спочатку визначимо висоту конуса – h_k .

Використавши $\triangle MFC$ (рис. 6.7) можемо записати $h_k = FC$.

З рівняння (6.20), висота конуса h_k виразиться формулою:

$$h_k = \frac{d_k \cdot ctg(\alpha/2)}{2 \cdot \cos(\pi/6)}. \quad (6.27)$$

Для випадку коли $\alpha = 30^\circ$, підставивши у вищезгадану формулу значення $ctg(\alpha/2)$ і $\cos(\pi/6)$ отримаємо $h_k = 2,155 \cdot d_k$.

Тоді величина вертикального ходу конуса h_g (рис. 2.9 а) виразиться залежністю. $h_g = MM_1$

З врахуванням залежності (6.21) отримаємо

$$h_g = 0,5 \cdot d_k \left[\frac{ctg(\alpha/2)}{\cos(\pi/6)} - 1 - ctg(\alpha/2) \cdot \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right) \right] \quad (6.28)$$

Для випадку, коли $\alpha = 30^\circ$ отримана формула набуде вигляду $h_g = 1,43 \cdot d_k$.

5. Величина радіального відцентрового переміщення h_r кульок від початкового їх положення до контакту із оброблюваною циліндричною поверхнею деталі (рис. 6.6) буде дорівнювати величині O_1O_2 . З врахуванням залежності (6.19) отримаємо

$$h_r = 0,5 \cdot d_k \left[\frac{ctg(\alpha/2)}{\cos(\pi/6)} - 1 - ctg(\alpha/2) \cdot \left(\frac{1}{\cos(\pi/6)} - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right) \right] \cdot tg(\alpha/2) \quad (6.29)$$

Для випадку, коли $\alpha = 30^\circ$ величина h_r буде дорівнювати

$$h_r = 1,43 \cdot d_\kappa \cdot 0,2679 = 0,383 \cdot d_\kappa.$$

7. Глибина h_m центрального отвору меншого діаметра d_m у корпусі (рис. 6.6 б) буде рівна

$$h_m = C_1O_0 = KC_0 - KC_1 + \Delta;$$

$$KC_0 = FC = h_\kappa = \frac{d_\kappa \cdot \text{ctg}(\alpha/2)}{2 \cdot \cos(\pi/6)}; KC_1 = d_\kappa; \Delta = k_0 \cdot d_\kappa; k_0 = 0,1 \dots 0,4.$$

$$h_m = d_\kappa \left(\frac{\text{ctg}(\alpha/2)}{2 \cdot \cos(\pi/6)} - 1 + k_0 \right). \quad (6.30)$$

8. Величина меншого діаметра d_m центрального отвору у корпусі дорівнюватиме.

$$d_m = 2 \cdot QC_1 + \Delta.$$

$$3 \Delta C_0QC_1 - QC_1 = C_1C_0 \cdot \text{tg}(\alpha/2);$$

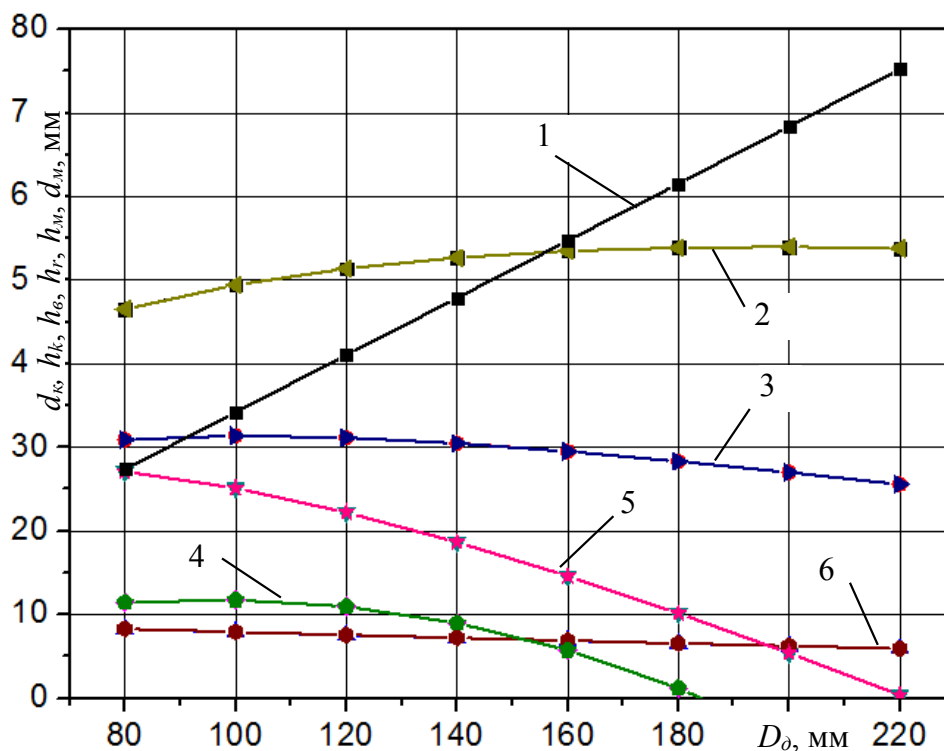
$$C_1C_0 = KC_0 - KC_1 = h_\kappa - d_\kappa = d_\kappa \left(\frac{\text{ctg}(\alpha/2)}{2 \cdot \cos(\pi/6)} - 1 \right);$$

$$QC_1 = d_\kappa \cdot \text{tg}(\alpha/2) \cdot \left(\frac{\text{ctg}(\alpha/2)}{2 \cdot \cos(\pi/6)} - 1 \right).$$

З врахуванням останнього отримаємо

$$d_m = 2 \cdot d_\kappa \left(\frac{1}{2 \cdot \cos(\pi/6)} - \text{tg}(\alpha/2) + k_0 \right). \quad (6.31)$$

У випадку коли $\alpha = 30^\circ$ і $k_0 = 0,1$ величина d_m буде дорівнювати $d_m = 0,818 \cdot d_k$.



1 – d_k ; 2 – h_k ; 3 – h_6 ; 4 – h_r ; 5 – h_m ; 6 – d_m

Рисунок 6.7 – Значення конструктивних параметрів інструмента для формування регулярних мікрорельєфів обкочуванням в залежності від діаметра D_0 оброблюваної внутрішньої циліндричної поверхні:

Отримані залежності надають можливість спроектувати працездатний інструмент для оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь віброобкочуванням. За отриманими залежностями при вихідних даних $d_k = 0,27D_0$ мм; $k_0 = 0,1$ мм побудовані графіки залежностей відповідних конструктивних параметрів від діаметра оброблюваної поверхні деталі.

6.3 Вплив розміщення деформувальних елементів на параметри регулярного мікрорельєфу

Оскільки було доведено [116, 210, 238, 240, 256, 266,], що збільшення кількості деформувальних елементів підвищує продуктивність формування РМР завдяки можливості збільшення подачі, то обґрунтованим є використання багато кулькових інструментів для формування РМР. Запропоновано інструмент для формування РМР з двома рядами деформувальних елементів, що забезпечує формування РМР різних типів за один прохід.

Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням (рис. 6.8), що складається з корпусу 1, виконаного у вигляді пустотілого циліндра, який своєю внутрішньою циліндричною поверхнею 2 осерухомо спряжений за допомогою направляючих шпонок 3 із циліндричною оправкою 4.

Корпус 1 по правому і лівому торцях 5 і 6 за допомогою правого і лівого фланців 7 і 8 та гвинтів 9, 10 і 11 і 12 жорстко з'єднані із сепаратором 13, виконаним у вигляді пустотілого циліндра. У стінці сепаратора 13 виконано три рівномірно розміщених по колу циліндричних отвори 14, у які вільно встановлені деформувальні елементи – кульки 16, а на певній відстані від них виконано додаткові три рівномірно розміщених по колу циліндричних отвори 15, у які вільно встановлені додаткові кульки 17. На зовнішній циліндричній поверхні корпусу 1, навпроти отворів 14 і 15 сепаратора, своєю внутрішньою циліндричною поверхнею встановлені кільця 18 і 19 з зовнішніми конічними поверхнями 20 і 21. Ці кільця підпружинені назустріч одне одному пружинами стиснення 22 і 23, а пружини з іншого боку своїми торцевими поверхнями обперті на регульовальні гайки 24 і 25, що зафіксовані контргайками 26 і 27.

Навпроти отворів 14 і додаткових отворів 15 у стінці сепаратора 13 виконані наскрізні технологічні отвори 28 і 29. Корпус 1 разом із сепаратором 13, кульками 16 і додатковими кульками 17 через вільну поверхню правого фланця підпружинений пружиною стиснення 30 обпертою на торець 31 фланця

32 оправки 4, в напрямі до торцевого кулачка 33, який жорстко з'єднаний з вихідним валом 34 привода обертового руху 35.

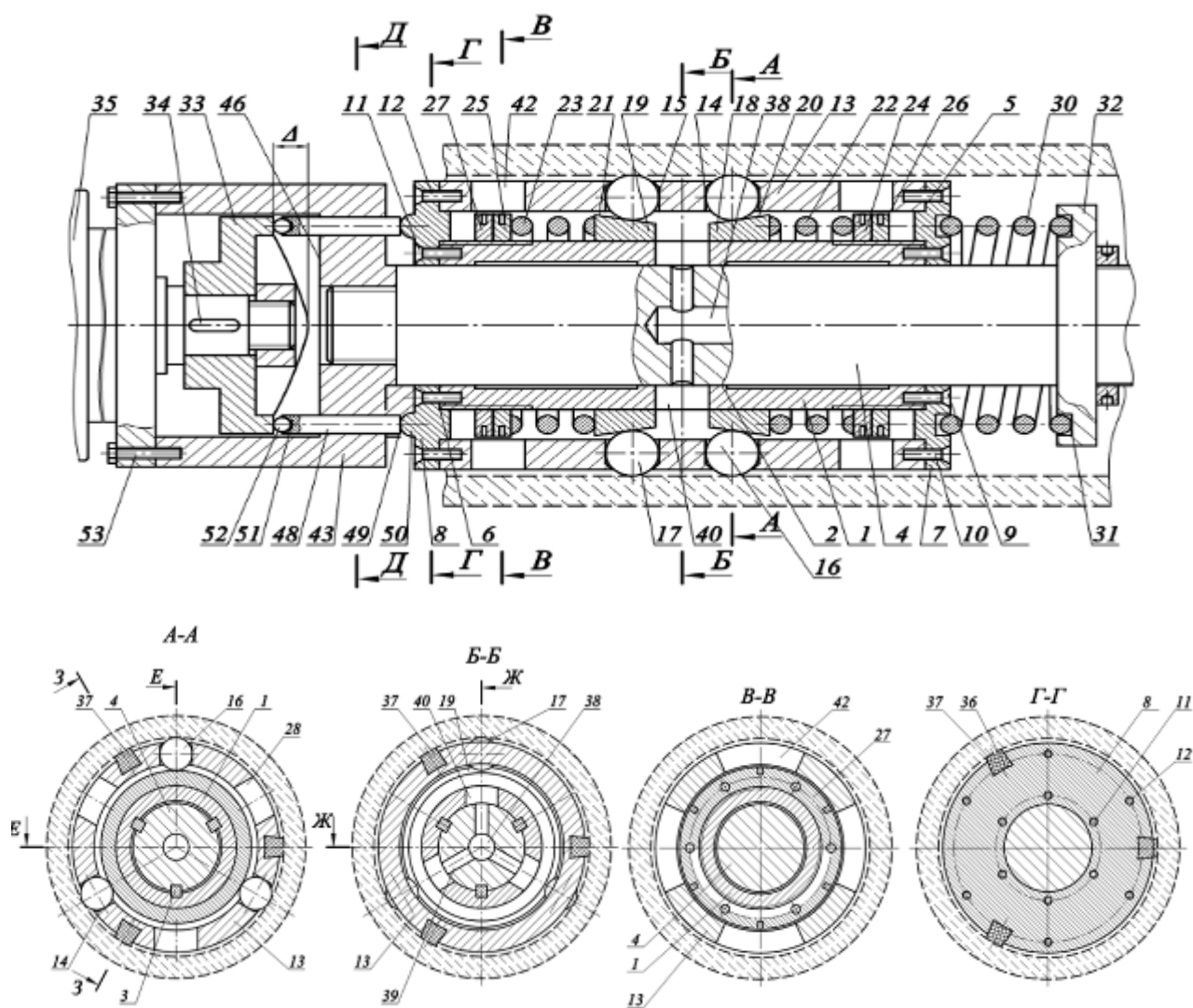


Рисунок 6.8 – Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням [217]

На зовнішній циліндричній поверхні оправки 4, вздовж повздовжньої осі сепаратора рівномірно по колу розміщені три повздовжні пази 36, у яких встановлені, напрямні 37, наприклад із поліуретану.

В оправці 4 співвісно з віссю оправки виконаний центральний канал 38 діаметром D , для подачі змащувально-охолоджувальної рідини, який з'єднаний із трьома радіальними каналами 39, кожен діаметром d , які розміщені посередині міжцентрової віддалі між кульками 16 і 17.

Співвідношення діаметрів D і d визначається з умови недопущення явища

дроселювання, тобто $S_{ц.к.} = \pi D^2 / 4 > 3S_{р.п.} = 3\pi d^2 / 4$, звідки $D > d\sqrt{3}$.

В стінці корпусу 1 на рівці осей радіальних каналів 39 виконані наскрізні вікна 40 діаметром більшим діаметра радіальних каналів 39. Для регулювання положення регулювальних 24 і 25 та фіксуючих гайок 26, 27 в стінці сепаратора 13 навпроти цих гайок виконані симетрично розміщені по колу наскрізні вікна 41 і 42.

На нижньому лівому кінці оправки 4 загвинчений стакан 43 і зафіксований гвинтами 44 і контргайками 45. У днищі 46 стакана 43 паралельно осі оправки 4 виконані два діаметрально-протилежно розміщені отвори 47, через які пропущені циліндричні штовхачі 48, які своїми правими торцями 49 обперті на сферичний виступ 50 лівого фланця 8, а лівими торцями 51 через кульки 52 спряжені із профілем торцевого кулачка 33. Привід обертового руху 35 з фланцевим з'єднанням закріплений за допомогою болтів 53 до стакана 43.

Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням працює наступним чином.

Спочатку здійснюють налаштування інструмента загвинчуванням регулювальних гайок 24 і 25, які стискають відповідно пружини 22 і 23, примушуючи переміщатись назустріч один одному кільця 18 і 19 і відцентрово у радіальних напрямках деформувальні елементи – кульки 16 і 17. При досягненні заданого зусилля вібраційного обкочування з яким кулька діє на контактуючу з нею циліндричну оболонку положення регулювальних гайок 24 і 25 фіксується контргайками 26 і 27.

Таким чином інструмент налаштований на задане зусилля вібраційного обкочування. Заготовку – циліндр, наприклад гільзу блока циліндрів двигуна внутрішнього згорання встановлюють у спеціальній пристрій металорізального верстата і надають їй обертового руху – кругової подачі.

Оправку 4 закріплюють у штанзі, яка закріплена на супорті з можливістю надання їй поступального руху – повздовжньої подачі. Встановлюють інструмент у внутрішню циліндричну поверхню заготовки – циліндра за допомогою трьох напрямних 37. В залежності від відстані L в осьовому

напрямку між центрами кульок 16 і додаткових кульок 17, кута α зміщення кульок 16 відносно додаткових кульок 17 в напрямі перпендикулярному осі інструменту можна отримати різні види регулярних мікрорельєфів: з паралельними канавками; із асинфазними канавками; з канавками, що перетинаються та інші.

Для забезпечення необхідної амплітуди регулярних мікрорельєфів хід Δ торцевого кулачка вибирається рівним амплітуді коливань регулярного мікрорельєфу.

Після підготовчих операцій вмикають привід обертового руху 35 кулачка 33, який забезпечує осциляційний рух кульок 16 і 17, повздовжню подачу, яка забезпечує повздовжній рух інструмента і обертовий рух заготовки.

Таким чином, використання запропонованого інструменту забезпечить формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях в тому числі довгомірних, що підвищить їх якісні показники і експлуатаційні властивості.

Для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з паралельними канавками необхідно, щоб кількість подвійних ходів i інструменту за один оберт заготовки була цілим числом [269]. Однак при формуванні РМР багатоманітним інструментом цієї умови недостатньо.

$$\begin{cases} i_{\text{об.х.}} = \frac{\pi \cdot D_3}{\cos \theta \cdot \lambda} \\ k = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot \cos \theta}{\lambda \cdot n} \end{cases} \quad (6.32 \text{ 2.33})$$

де n – кількість деформувальних елементів в ряді, шт;

λ – крок невірностей, мм;

θ – кут напрямку нерівностей, град; $\theta = \arctg\left(\frac{s}{\pi D}\right)$;

k – ціле число.

Для отримання регулярних мікрорельєфів різних типів необхідне виконання певних умов. Причому отримання однакових регулярних мікрорельєфів можливе при різному взаємному розміщенні деформувальних елементів 1-6 один відносно одного, як із їх зміщенням на певний кут (рис. 6.8) так і з розташуванням їх в співвісно (рис. 6.9).

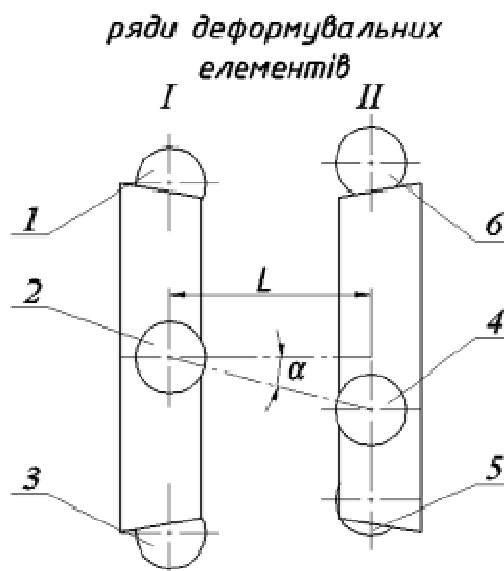


Рисунок. 6.9 – Схема розташування деформувальних елементів в інструменті

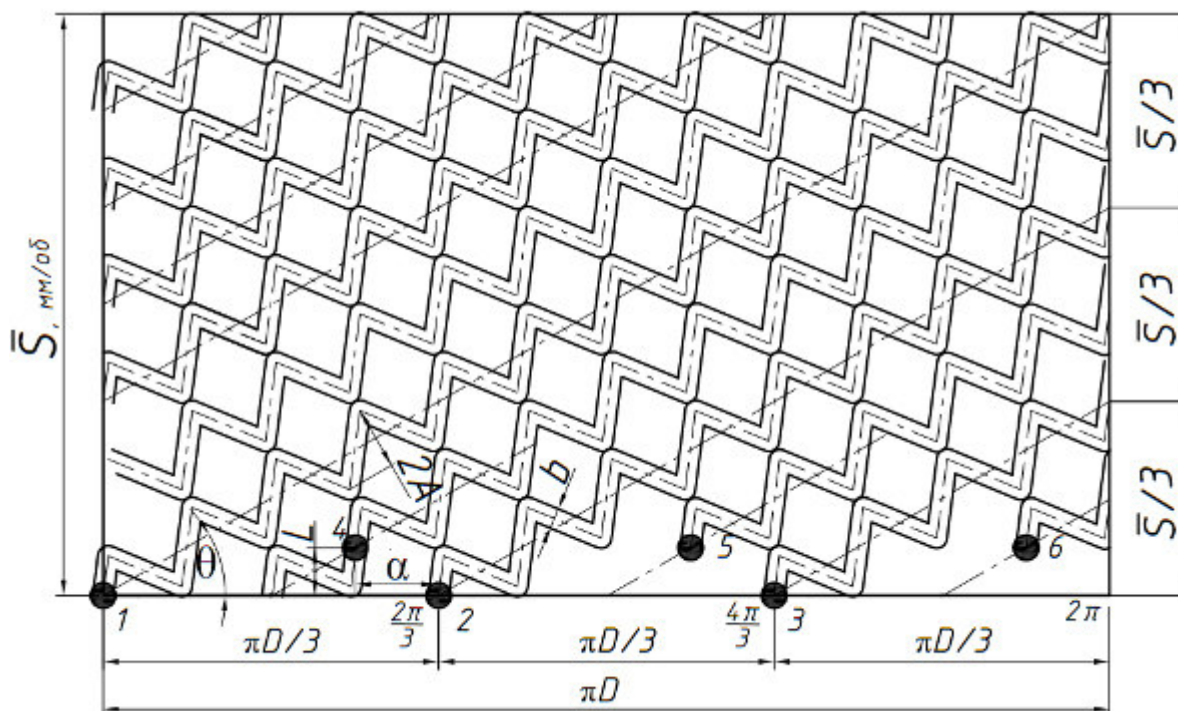


Рисунок 6.9 – Розгортка циліндричної поверхні з зображенням положення деформувальних елементів інструменту зміщених на кут α для формування асинфазних РМР

Для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з асинфазними трикутними чи, наприклад, синусоїдальними канавками, що дотикаються у вершинах інструментом з розташуванням рядів деформувальних елементів зміщених на кут α (рис.6.9) повинні виконуватись наступні умови:

– відстань в осьовому напрямку між центрами кульок першого і другого ряду повинна дорівнювати

$$L = s / 12, \text{ мм} \quad (6.33)$$

– кут зміщення другої групи кульок відносно першої повинен дорівнювати

$$\alpha = 60 \cdot \sin^2 \left(\arctg \left(\frac{s}{\pi D} \right) \right), \text{ град.} \quad (6.34)$$

– амплітуда повинна дорівнювати

$$A = \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b, \text{ мм.} \quad (6.35)$$

$$\theta = \arctg \left(\frac{s}{\pi D} \right) \text{ град.} \quad (6.36)$$

де b – ширина відбитку деформувального елемента, мм.

Для заданої схеми розташування деформувальних елементів (рис.6.9) для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з асинфазними канавками, що не дотикаються чи перетинаються у вершинах змінювати необхідно змінити лише амплітуду коливань інструменту.

– для РМР з канавками, що не дотикаються амплітуда визначається із

залежності

$$A < \frac{s \cdot \cos\theta}{12} - b \text{ мм.} \quad (6.37)$$

– для РМР з канавками, що перетинаються амплітуда визначається із залежності

$$A > \frac{s \cdot \cos\theta}{12} - b \text{ мм.} \quad (6.38)$$

Для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з асинфазними трикутними чи, наприклад, синусоїдальними канавками, що дотикаються у вершинах інструментом з розташуванням рядів деформувальних елементів один навпроти одного (рис.6.8) повинні виконуватись наступні умови:

– відстань в осьовому напрямку між центрами кульок першого і другого ряду повинна дорівнювати

$$L = s / 6, \text{ мм} \quad (6.39)$$

де s – подача інструменту, мм/об;

α – кут зміщення другого ряду кульок відносно першого повинен дорівнювати $\alpha = 0^\circ$ град.

– амплітуда повздовжніх коливань інструмента повинна дорівнювати

$$A = \frac{s \cdot \cos\theta}{12} - b, \text{ мм} \quad (6.40)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{s}{\pi D}\right) \text{ град.} \quad (6.41)$$

де b – ширина відбитку деформувального елемента, мм.

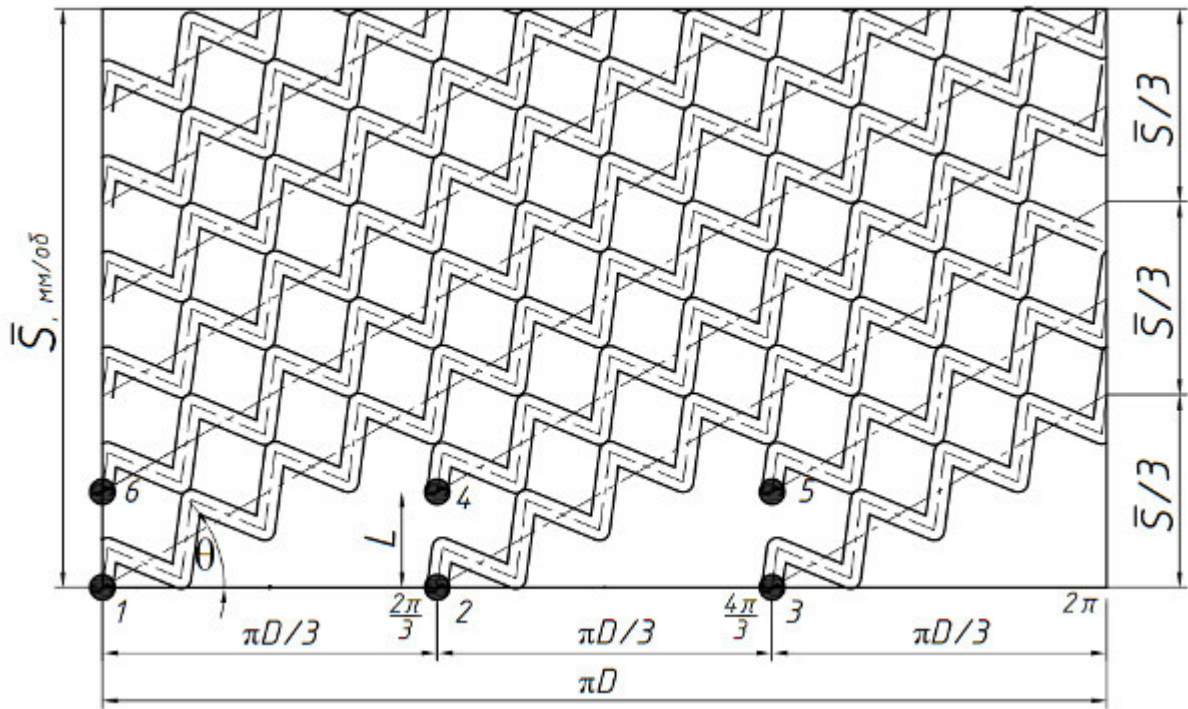


Рисунок 6.10 – Розгортка циліндричної поверхні з зображенням положення деформувальних елементів інструменту встановлених в ряд для формування асинфазних РМР

Для заданої схеми розташування деформувальних елементів (рис.6.11) для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з асинфазними канавками, що не дотикаються чи перетинаються у вершинах змінювати необхідно лише амплітуду коливань інструменту.

– для забезпечення РМР з канавками, що не дотикаються амплітуда визначається із залежності

$$A < \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b \text{ мм.} \quad (6.42)$$

– для забезпечення РМР з канавками, що перетинаються амплітуда визначається із залежності

$$A > \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b, \text{ мм.} \quad (6.43)$$

Для отримання повністю регулярного мікрорельєфу з паралельними трикутними канавками (рис.6.11), які дотикаються повинні виконуватись наступні умови:

– відстань в осьовому напрямку між центрами кульок першої і другої групи повинна дорівнювати

$$L = \frac{\pi \cdot D \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{6}, \text{ мм} \quad (6.44)$$

– кут зміщення другої групи кульок відносно першої повинен дорівнювати

$$\alpha = 60 \cdot \sin^2 \left(\arctg \left(\frac{s}{\pi D} \right) \right), \text{ град} \quad (6.45)$$

– амплітуда повинна дорівнювати

$$A = \sqrt{\left(\frac{\lambda \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \theta}{8 \cdot b \cdot n} \right)^2 - \frac{\lambda^2}{16}}, \quad (6.46)$$

де λ – крок невірностей

$$\theta = \arctg \left(\frac{s}{\pi D} \right). \quad (6.47)$$

В загальному випадку, залежності для визначення параметрів розміщення деформувальних елементів для формування заданих параметрів регулярних мікрорельєфів подані в таблиці 6.2.

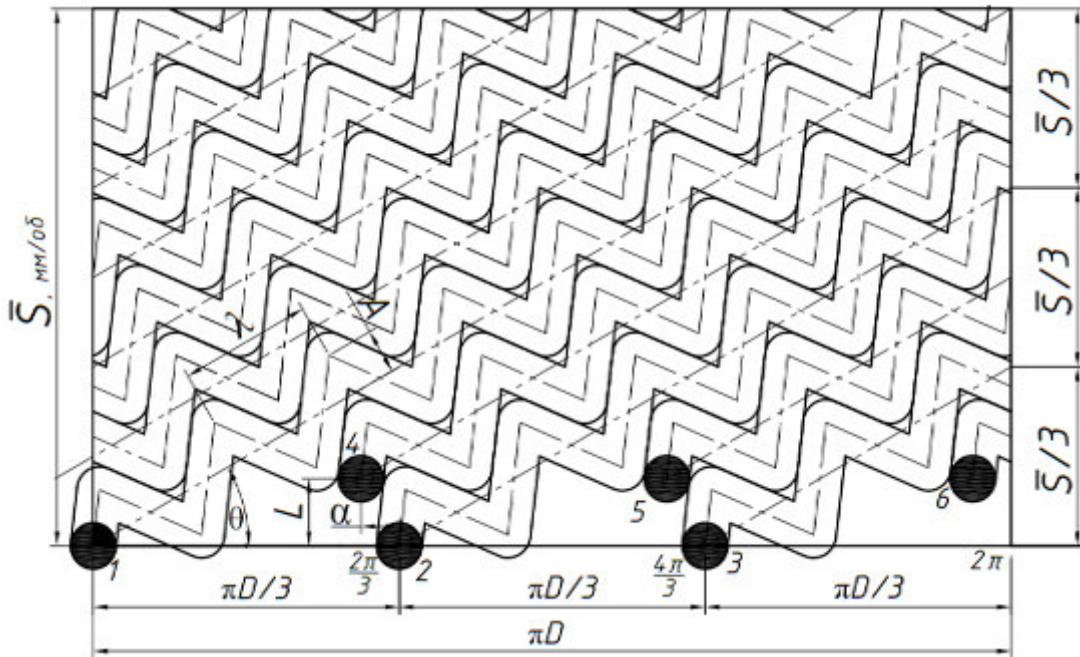


Рисунок 6.11 – Розгортка циліндричної поверхні з зображенням положення деформувальних елементів інструменту встановлених в ряд для формування синфазних трикутних РМР

Таблиця 6.2 – Умови формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях інструментом з двома рядами деформувальних елементів

Вид регулярного мікрорельєфу	Без зміщення деформувальних елементів	З зміщенням деформувальних елементів
1	2	3
З асинфазними трикутними або синусоїдальним і канавками, що дотикаються у вершинах	$L = \frac{s}{2n}$ $A = \frac{s \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{s}{\pi \cdot D} \right) \right]}{4 \cdot n} - \frac{b}{2}$ $\alpha = 0$	$L = \frac{s}{4n}$ $\alpha = \frac{360 \cdot \sin^2 \left[\arctg \left(\frac{s}{\pi \cdot D} \right) \right]}{n}$ $A = \frac{s \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{s}{\pi \cdot D} \right) \right]}{4 \cdot n} - \frac{b}{2}$

1	2	3
З синфазними (паралельними) трикутними канавками, що дотикаються	—	$\begin{cases} i_{\text{об.х.}} = \frac{\pi \cdot D_3}{\cos \theta \cdot \lambda} \\ k = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot \cos \theta}{\lambda \cdot n} \end{cases}$ $L = \frac{\pi \cdot D \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{2 \cdot n}$ $\alpha = \frac{360 \cdot \sin^2 \left[\arctg \left(\frac{s}{\pi \cdot D} \right) \right]}{2 \cdot n}$ $A = \sqrt{\left(\frac{\lambda \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \theta}{8 \cdot b \cdot n} \right)^2 - \frac{\lambda^2}{16}}$

6.4 Забезпечення регулярності мікрорельєфу кінематичним зв'язком верстату

Недоліком відомих способів формування частково-регулярного мікрорельєфу на циліндричних поверхнях вібраційним обкочуванням на верстатах з механічною коробкою подач є незабезпечення однорідності виду утвореного мікрорельєфу, що виражається у його зміні по довжині траєкторії, наприклад, вид мікрорельєфу з паралельними канавками що не дотикаються поступово переходить у мікрорельєф з канавками, що дотикаються, або мікрорельєф з канавками, що перетинаються (рис. 6.11). Вказаний недолік не забезпечує стабільності відносної площі віброобкочування, що є причиною нестабільності експлуатаційних властивостей окремих площ поверхонь деталей з таким мікрорельєфом.

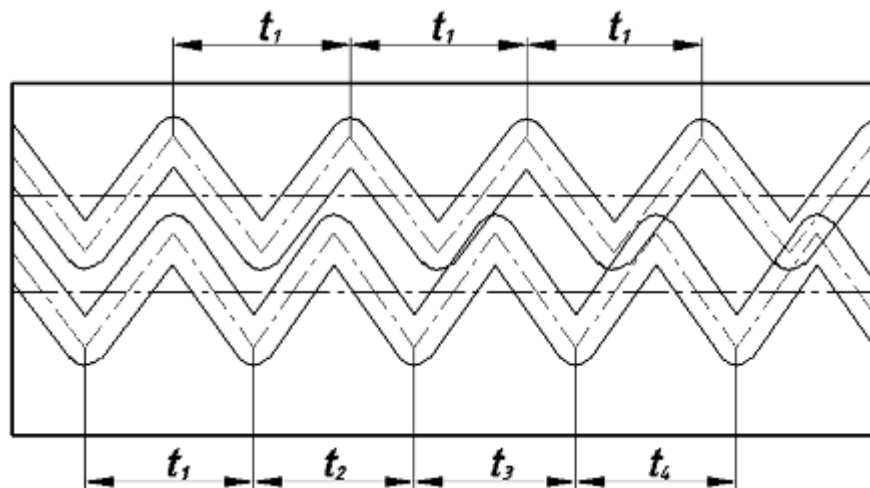


Рисунок 6.11 – Схема спотворення частково-регулярного мікрорельєфу

Для усунення вказаного недоліку запропоновано спосіб формування частково-регулярного мікрорельєфу на циліндричних поверхнях вібраційним обкочуванням, який реалізується наступним чином. Заготовку 1 (рис. 6.12) встановлюють, наприклад, у патрон 2 токарно-гвинторізного верстату і закріплюють. До оброблюваної циліндричної поверхні 3 заготовки 1 підводять інструмент-віброобкатник 4 з кулькою 5 діаметром D_k і за допомогою пружного елемента – пружини 6 створюють необхідне зусилля вібраційного обкочування. Регулювання частоти обертання n_3 заготовки 1 забезпечують механізмом головного обертового руху, в який входить коробка швидкостей 7.

Регулювання величини повздовжньої подачі здійснюють коробкою подач 8. Регулювання частоти осциляцій інструмента 4 здійснюють механізмом осциляційного руху 9.

В залежності від виду частково-регулярного мікрорельєфу встановлюють певне співвідношення між осциляцій інструменту n_o і частотою обертання заготовки n_3 яке, наприклад для виду регулярного мікрорельєфу з паралельними канавками, ставить будь-яке ціле число, тобто $n_o/n_3 = i$, де $i = 1, 2, 3...4$.

Після остаточного налаштування включають електродвигун 10 і через роздавальну коробку 11 головний обертовий рух Dr передається на коробку швидкостей 6 і заготовку 1, а також на коробку подач 8 обертовий рух

6.5 Конструювання нових конструкцій адаптивних розточувальних головок

Дворізцева розточувальна головка (рис. 6.13) складається з корпусу 1, в якому з можливістю регулювання положення встановлені два діаметрально-протилежні різці 2 і 3. Корпус 1 має вигляд кронштейна з хвостовиком 4 з однієї сторони і U-подібними бічними поверхнями 5 і 6 паралельними осі хвостовика 4 – з іншої. Різці 2 і 3 закріплені на рівноплечому важелі 7, який встановлений з можливістю повороту на осі 8 у вигляді спеціального болта. Вісь 8 розміщена у співвісних отворах 9 і 10 виконаних на U-подібних бічних поверхнях 5 і 6 і зафіксована від осьового переміщення гайкою 11. В корпусі 1 в діаметрально-протилежних напрямках, паралельно U-подібним бічним поверхням 5 і 6 навпроти рівноплечого важеля 7 виконано два отвори 12 і 13, в яких розміщені упорні гвинти 14 і 15. Довжина упорних гвинтів більша довжини отворів 12 і 13. Упорні гвинти 14 і 15 з сторони хвостовика 4 зафіксовані від осьового переміщення гайками 16 і 17. Вільні кінці 18 і 19 упорних гвинтів 14 і 15 виступає з корпусу 1 з сторони U-подібних бічних поверхонь таким чином, що забезпечується коливний рух рівноплечого важеля 7 з зазором $\Delta_{важ}$. Цей зазор визначається за формулою:

$$\Delta_{важ} = l_{важ} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{важ}) + R_{важ} \left(\frac{1}{\sin(90 - \alpha_{важ})} - 1 \right), \text{ мм}, \quad (6.48)$$

де $l_{важ}$ – відстань від осі обертання рівноплечого важеля, мм;

$\alpha_{важ}$ – кут повороту рівноплечого важеля, град.

$$\alpha_{важ} = \arccos \left(\frac{R_{важ} - a_{дон}}{r_{зв}} \right), \quad (6.49)$$

де $R_{важ}$ – відстань від осі обертання рівноплечого важеля до центра радіуса вершини різця, мм;

$a_{дон}$ – допуск на оброблюваний розмір, мм;

r_{26} – радіус основи упорного гвинта, мм.

Також похила поверхня 20 корпусу 1 з сторони вільних кінців 18 і 19 упорних гвинтів 14 і 15 є у взаємодії з резиновим ущільненням 21 і 22. З іншої сторони резинові ущільнення 21 і 22 є у взаємодії з поверхнею рівноплечого важеля 7, які гасять коливання рівноплечого важеля під час роботи. Резинові ущільнення 21 і 22 від переміщення зафіксовані накладною гайкою 23 і упорним кільцем 24, які своїми внутрішніми поверхнями 25 і 26 загвинчені на зовнішню поверхню 27 корпуса 1.

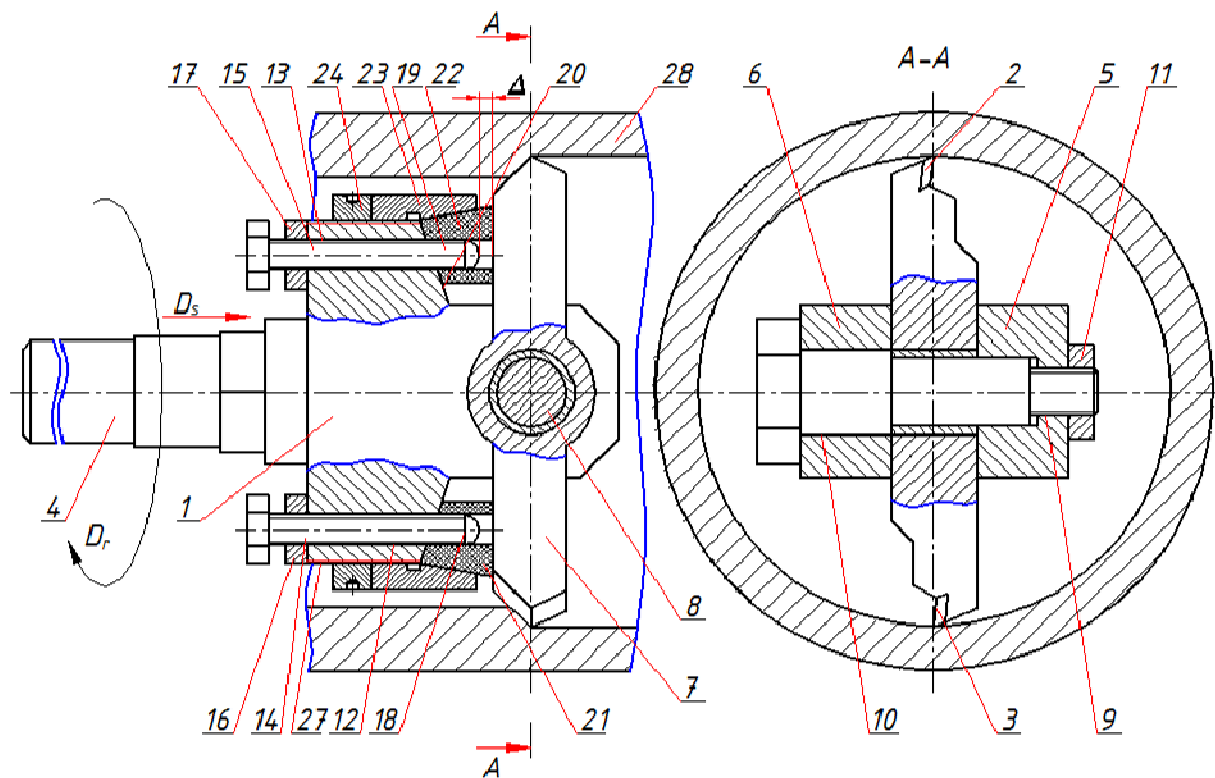


Рисунок 6.13 – Схема адаптивної дворіцевої розточувальної головки

Дворіцева розточувальна головка працює наступним чином. Дворіцеву розточувальну головку використавши хвостовик 4 відгвинчують з оправки (на фіг. не показано). На оправку встановлюють заготовку 28, закручують хвостовик 4 у оправці, а заготовку 28 у пристрої встановленому на патроні (на

фіг. не показано), включають головний рух D_r , обертання заготовки і рух подачі D_s супорта справа наліво і здійснюють розточування.

Під час роботи дворіцевої розточної головки руйнування стружки здійснюється забезпеченням коливного руху рівноплечого важеля 7. Разом з тим для забезпечення вказаного допуску на розмір коливання рівноплечого важеля 7 не повинно перевищувати кута α , який отримують зміщенням упорних гвинтів 14 і 15 на величину $\Delta_{важ.}$.

Таким чином, запропонована дворіцева розточувальна головка забезпечує відсутність відхилення від прямолінійності осі оброблюваного отвору, а також зменшення шорсткості обробки.

6.6 Спосіб вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь

Існуючі способи вимірювання шорсткості поверхні мають ряд недоліків. Недоліком відомих способів вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь є неврахування стохастичного характеру параметра шорсткості R_a і те, що при цьому за результат приймають середнє значення, а також не враховують того, що у циліндричних поверхнях сформованих волочінням, калібруванням у фільтерах, протягуванням і дернуванням сліди оброблення паралельні твірній циліндричної поверхні і її повздовжній осі і при цьому як результат отримують занижений результат.

Метою даного дослідження є створення способу вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь, сліди оброблення яких паралельні твірній цих поверхонь, який би враховував стохастичний характер мікронерівностей, напрям їх розміщення і забезпечував би високу достовірність отриманих результатів.

Запропонований спосіб реалізується наступним чином. Циліндричну деталь 1 із зовнішньою циліндричною поверхнею 2 вільно встановлюють, наприклад, у передній центр 3 і підтискують заднім центром 4. В задану найвищу верхню точку B_1 зовнішньої циліндричної поверхні 2, наприклад I

(першої) траси, встановлюють голку 5 профілометра, яка закріплена на штокові 6. Включають профілометр і обертання заготовки, забезпечуючи при цьому таку лінійну швидкість обертання циліндричної поверхні заготовки, яка дорівнює встановленій приладом заданій швидкості V прямолінійного переміщення голки, що забезпечується профілометром, тобто забезпечують частоту n обертання заготовки, яка дорівнює $n = V / \pi D$, де D – діаметр досліджуваної циліндричної поверхні і при цьому забезпечують кут ψ повороту цієї поверхні який не менше $\psi \geq 360^\circ \cdot L_{\text{тр}} / \pi D$, де $L_{\text{тр}}$ – довжина траси вимірювання, яка використовується для вимірювання нерівностей, що характеризують шорсткість поверхні. Так як сліди мікронерівностей паралельні твірній зовнішньої циліндричної поверхні, то голка профілометра проковзуючи по цих мікронерівностях і ощупуючи їх буде знаходитись у коливному русі і дозволить приладу зафіксувати значення середнього арифметичного відхилення профілю R_a . Після цього голку піднімають вгору і забезпечують при цьому відсутність її контакту з досліджуваною циліндричною поверхнею і голку разом з профілометром переміщують вздовж повздовжній осі деталі на один крок $t = L_\delta / i$, де L_δ – певна довжина досліджуваної поверхні, а заготовку повертають у протилежному напрямі на кут $\omega = \psi - 360/i = 360^\circ \left(\frac{L_{\text{тр}}}{\pi D} - \frac{1}{i} \right)$, потім голку встановлюють у найвищій точці B_2 досліджуваної циліндричної поверхні і повторюють вищеописаний прийом здійснюючи вимірювання на II трасі.

Аналогічно здійснюють вимірювання на інших III-X трасах, отримують 10 значень середнього арифметичного відхилення профілю $R_{a1}, R_{a2} \dots R_{a10}$, які приймають як випадкові величини з нормальним законом розподілу. Використовують теорію малої вибірки, зокрема метод ітерацій і визначають математичне сподівання $M(R_a)$ і вибірккову дисперсію $D(R_a)$ і знаходять максимальне значення параметра шорсткості R_{amax} за формулою $R_{amax} = M(R_a) + 3\sqrt{D(R_a)}$, яке приймають за істинне значення.

У випадку вимірювання шорсткості внутрішньої циліндричної поверхні вище згадані прийоми повторюють з різницею у тому, що циліндричну пустотілу деталь 7 закріплюють, наприклад, у трьохкулачковому патроні 8, а голку 5 встановлюють у найнижче розміщених точках $B_1 \dots B_{10}$ внутрішньої циліндричної поверхні на I, II, III...X трасах. Аналогічно повторюють прийоми описані вище і отримують статистичний ряд значень $R_{a1}, R_{a2} \dots R_{a10}$, які піддають статистичному обробленню і отримують математичне сподівання $M(R_a)$, вибіркочну дисперсію $D(R_a)$ і максимальне значення середнього арифметичного відхилення профілю $R_{amax} = M(R_a) + 3\sqrt{D(R_a)}$.

Вимірювання шорсткості зовнішньої циліндричної поверхні отриманої чистовим точінням здійснювалось з використанням профілометра моделі 296.

Діаметр досліджуваної циліндричної поверхні $D=12$ мм, а її довжина $L = 50$ мм. Швидкість переміщення голки профілометра моделі 296 $V=60$ мм/хв. За даними паспорта профілометра довжина траси вимірювання $L_{тр} = 6$ мм, а відсік кроку – довжина базової лінії $l=2,5$ мм.

Визначають частоту обертання вимірювальної деталі $n = V / \pi D = 60 / 3,14 \cdot 12 = 1,59$ об/хв.

Визначають кут повороту ψ вимірюваної деталі

$$\psi \geq 360 \cdot L_{тр} / \pi \cdot D = 360^\circ \cdot 6 / 3,14 \cdot 12 = 57,32^\circ .$$

Здійснюють вимірювання параметра шорсткості R_{a1} на першій трасі $R_{a1} = 0,68$ мкм. Голку виводять із контакту із досліджуваною поверхнею деталі і її повертають у протилежному напрямі на кут

$$\psi = 360^\circ \cdot \left(\frac{L_{mp}}{\pi \cdot D} - \frac{1}{i} \right) = 360^\circ \cdot \left(\frac{6}{3,14 \cdot 12} - 0,1 \right) = 21,32^\circ \text{ мм.}$$

У подальшому голку з профілометром переміщують вздовж осі деталі на крок $t = 5$ мм та доводять до контакту з досліджуваною поверхнею, повертають заготовку з частотою 1,59 об/хв. на кут $\varphi = 57,12^\circ$ і отримують значення параметра шорсткості на II трасі $R_{a2} = 0,7$ мкм.

Таблиця 6.3 – Значення параметра шорсткості на розміщених по довжині деталі і по куту її повороту трасах

№ траси	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
R_{ai} , МКМ	3,00	3,14	3,90	3,60	3,59	3,65	3,17	3,47	3,51	3,11

Повторюють вищеописані прийоми на всіх інших трасах і отримують значення R_{ai} , які подані у таблиці 6.3.

Математичне сподівання $M(R_a)$ і вибірккову дисперсію $D(R_a)$ для вибірки обсягом 10 значень визначають за методом ітерацій за теорією малої вибірки скориставшись формулами

$$M(R_a) = \frac{a+b}{2} \prod_{k=1}^n c_k + \sum_{k=1}^n \prod_{k=1}^n c_k \left\{ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{z_{1k}^2}{2}} - e^{-\frac{z_{2k}^2}{2}} \right) + r_{ak} [\Phi(z_{2k}) - \Phi(z_{1k})] \right\} \quad (6.50)$$

де k – кількість значень у вибірці;

$c_k (k = 1, \bar{n})$ – стала величина, яка дорівнює

$$c_k = \frac{1}{1 + \Phi\left(\frac{b - r_{ak1}}{\sigma_a}\right) - \Phi\left(\frac{a - r_{ak1}}{\sigma_a}\right)}, \quad (6.51)$$

$\sigma = \frac{b-a}{6}$ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини R_a ;

$z_{1k} = \frac{a - r_{ak}}{\sigma}$ і $z_{2k} = \frac{b - r_{ak}}{\sigma}$ – межі інтегрування для випадкової величини

R_a ;

$[a;b]$ – проміжок зміни величини R_a вважається відомим і таким, що

$a = r_{K_{\min}}$, $b = r_{K_{\max}}$ ($r_{K_{\min}}$ і $r_{K_{\max}}$ – відповідно найменше і найбільше значення серед середніх арифметичних відхилень профілюю $r_k (k = 1, \bar{n})$ експериментальних даних випадкової величини R_a ;

$\Phi(z_{1k})$, $\Phi(z_{2k})$ – функції Лапласа для випадкової величини R_{asq}

$$D(R_{asq}) = \frac{a_1^2 + a_1 \cdot b_1 + b_1^2}{3} \prod_{k=1}^n C_{ak} + \sum_{i=1}^n C_k \left\{ \frac{\sigma_a}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{\sigma_a}{\sqrt{2\pi}} (\sigma \cdot z_{1k} + 2 \cdot r_k) \cdot e^{-\frac{z_{1k}^2}{2}} - (\sigma_a \cdot z_{2k} + 2 \cdot r_k) \cdot e^{-\frac{z_{2k}^2}{2}} \right] + (\sigma_a^2 + r_q^2) \right\} \times$$

$$\times \prod_{k=1}^n C_k + \sum_{i=1}^n C_k \left\{ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[-(\sigma \cdot z_{2k} + 2 \cdot t_{1k}) \cdot e^{-\frac{z_{2k}^2}{2}} \right] + (\sigma^2 + r_2^2) \right\} \quad (6.52)$$

Середнє квадратичне відхилення у цьому випадку буде дорівнювати

$$\sigma(R_{asq}) = \sqrt{D(R_{asq})} \quad (6.53)$$

Для даного випадку вибіркоче математичне сподівання визначене за формулою (2.38) становило $M(R_a) = 1,195$ (мкм), а середнє квадратичне відхилення $\sigma(R_a) = 0,217$ (мкм).

Співвідношення між $R_{a \max}$ і $M(R_a)$ становлять $\frac{R_{a \max}}{M(R_a)} \approx 1,195\%$, а

відносна похибка δ у відсотках складе:

$$\delta = \frac{R_{a \max} - M(R_a)}{M(R_a)} \cdot 100\% = \frac{3,993 - 3,342}{3,342} \cdot 100\% \approx 19,5\%$$

що вказує на суттєву відмінність між $M(R_a)$ і $R_{a \max}$.

Отримані дані підтверджують необхідність визначати максимальне значення $R_{a \max}$ і приймати його як істинне значення.

Таким чином, запропонований спосіб вимірювання шорсткості

циліндричних поверхонь забезпечує високу достовірність отриманих результатів.

6.7 Конструювання інструменту для формування регулярних мікрорельєфів на зовнішніх циліндричних поверхнях

Інструмент для чистового фінішного оброблення зовнішніх циліндричних поверхонь складається з корпусу 1 (рис. 6.15), виконаного у вигляді суцільної правильної шестигранної призми з центральним отвором 2, для розміщення заготовки 3. У трьох гранях корпусу 1 через 120° виконані ступінчасті наскрізні циліндричні отвори 4, осі яких мають одну спільну точку в центрі кола утвореного перпендикулярним до повздожньої осі перерізом центрального отвору 2. У цих ступінчастих отворах 4 з можливістю повороту, встановлені головки пружної дії 5, які складаються із ексцентричних стаканів 6, які закріплені до корпусу 1 гвинтами 7, з внутрішніх ексцентричних втулок 8, встановлених в отворах стаканів 6 і закріплених до них гвинтами 9 і осерухомих штоків 10 із закріпленими на внутрішніх їх кінцях деформуючими елементами - кульками 11.

У верхній частині осерухомих штоків 10 виконані отвори 12, вісі яких паралельні осі центрального отвору 2 корпусу 1 і у ці отвори 12 запресовані циліндричні пальці 13.

На зовнішніх кінцях осерухомих штоків 10 виконані частково-циліндричні поверхні 14, на які V-подібними пазами 15 розміщеними по середині із внутрішньої сторони оперті рівноплечі коромисла 16, 17, 18, кінці яких з'єднані між собою пружинами розтягу 19, 20, 21, причому чотири суміжні кінці трьох рівноплечих коромисел 16, 17 і 18 з'єднані між собою двома пружинами 19 і 20 більшої довжини, а інші два суміжні кінці двох рівноплечих коромисел 16 і 18 з'єднані однією пружиною 21 меншої довжини. Один кінець цієї пружини 21 спряжений із рівноплечим коромислом 16 через механізм натягу пружини 21 меншої довжини, який виконаний у вигляді тяги 22, що

одним своїм кінцем шарнірно встановлена у вилку 23 виконану на одному із кінців рівноплечого коромисла 16 за допомогою вісі 24 зафіксованої від осьового переміщення. На другому кінці тяги 22 виконана зовнішня різьбова поверхня 25, на яку нагвинчена своєю внутрішньою різевою поверхнею 26 ступінчаста втулка 27, яка зафіксована контргайкою 28. На ступінь меншого діаметра ступінчастої втулки 27 вільно встановлений стакан 29 з наскрізними отворами 30 і 31 на боковій циліндричній поверхні 32, в які запресований штифт 33, до якого одним кінцем закріплена пружина 21 меншої довжини.

Трьохпрофільний плоский кулачок 34 своїм центральним отвором 35 встановлений з можливістю обертового руху на циліндричній виступ 36, виконаний на одному із торців корпусу 1 і цей кулачок 34 зафіксований від осьового переміщення пружним розрізним кільцем 37 встановленим у виточку 38 на циліндричному виступі 36. В корпусі 1 із зміщенням на кут 60° відносно осей наскрізних циліндричних ступінчастих отворів 4 виконані три рівномірно розміщені по колу наскрізні отвори 39 призначені для встановлення інструменту в пристрій. В трьохпрофільному кулачку 34 виконані наскрізні криволінійні пази 40, осі симетрії яких співпадають з колом, на якому розміщені центри трьох наскрізних отворів 39 виконаних в корпусі 1 і ширина цих пазів більша від діаметра отворів 39. На торцевій поверхні плоского трьохпрофільного плоского кулачка 34 виконані три розміщені через 120° наскрізні отвори 41 для встановлення в них спеціального ключа для повороту трьохпрофільного плоского кулачка.

Інструмент для чистового фінішного оброблення працює наступним чином. Після налагодження інструменту за допомогою механізму натягу пружини 21 на задане зусилля, яке діятиме від деформуючих елементів кульок 11 на оброблювану поверхню заготовки 3, встановлюють у отвори 41 трьохпрофільного плоского кулачка спеціальний ключ і повертають за годинниковою стрілкою кулачок 34, периферійна поверхня якого знаходилась в контакті з циліндричними пальцями 13 і тим самим переміщують від центра корпусу 1 осерухомі штоки 10.

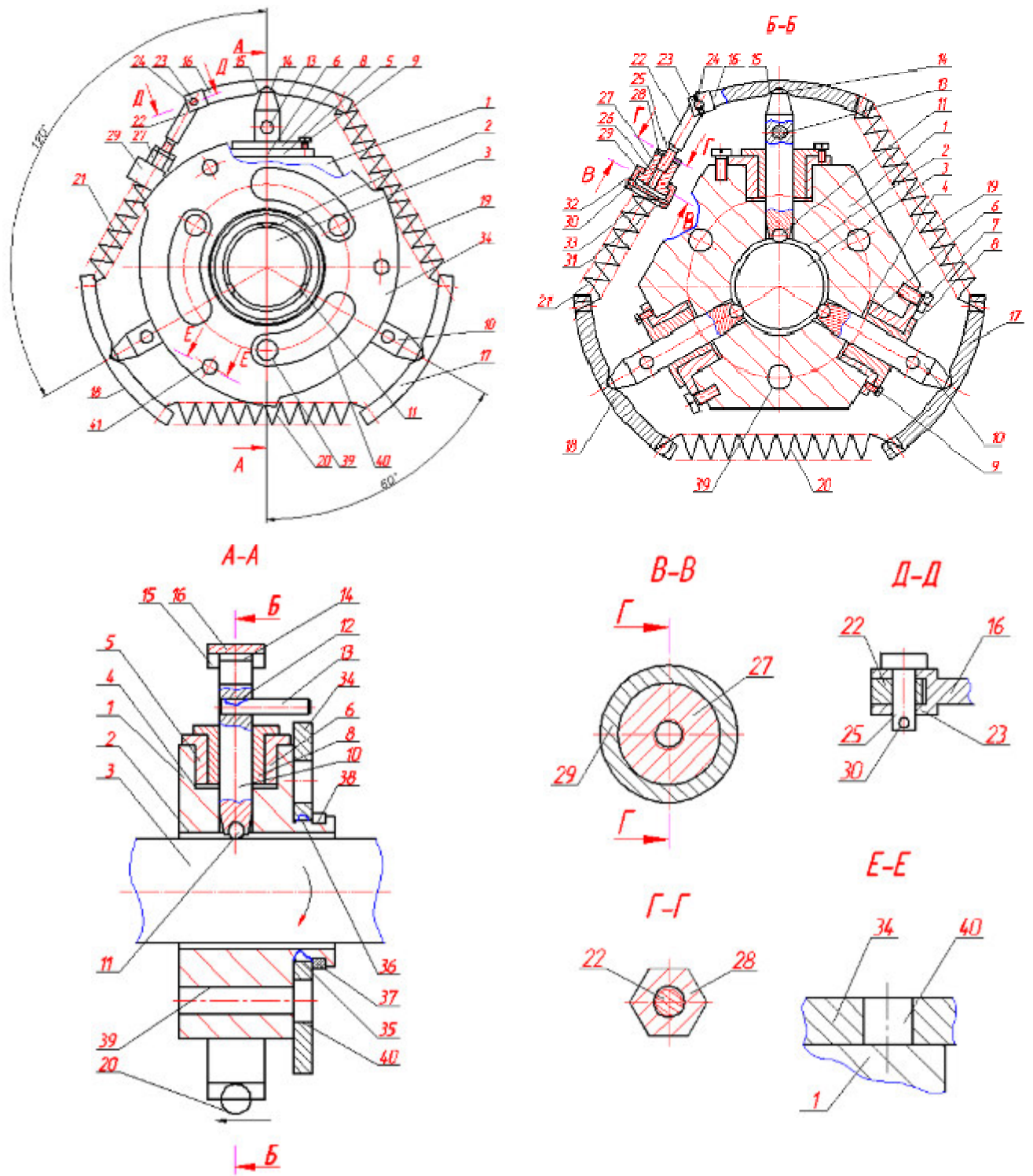


Рисунок 6.15 – Ескіз інструменту для формування регулярних мікрорельєфів на зовнішніх циліндричних поверхнях [233]

Встановлюють циліндричну заготовку 3 в центральний отвір 2 корпусу 1 і закріплюють цю заготовку 3, наприклад в центрах токарного верстату. Повертають трьохпрофільний плоский кулачок 34 у протилежному напрямі -

проти годинникової стрілки, і осерухомі штоки 10 під дією пружин розтягу 19, 20 і 21 сходяться до центра корпусу 1 і своїм деформуючими елементами - кульками 11 впираються в оброблювану поверхню заготовки 3 із заданим зусиллям, яке буде завжди однакове на кожному із трьох деформуючих елементів і при цьому між циліндричними пальцями 13 і периферією плоского трьохпрофільного кулачка 34 створюється зазор.

У випадку коли пружини розтягу 19, 20 і 21 створюють різні зусилля то за рахунок повертання рівноплечих коромисел 16, 17 і 18, які шарнірно з можливістю повороту, встановлені на циліндричні поверхні 15 зовнішніх кінців осерухомих штоків 10 деформуючі елементи-кульки 11 будуть діяти на оброблювану поверхню з однаковим зусиллям.

Включають одночасно обертання заготовки 3 і повздовжню подачу, паралельну повздовжній осі заготовки 3, інструменту для чистового фінішного оброблення зовнішніх циліндричних поверхонь і за рахунок поверхневого пластичного деформування здійснюють обкочування оброблюваної циліндричної поверхні заготовки 3 деформуючими елементами - кульками 11. При цьому рівнодійна сила від складових кожного деформуючого елемента, яка діє на заготовку 3 дорівнює нулю, що дозволяє обробляти нежорсткі заготовки і отримувати зміцнений поверхневий шар та зменшену шорсткість обробленої поверхні.

У випадку коли необхідно здійснити формування регулярних мікрорельєфів того чи іншого типу, інструменту додатково надають осцилюючий зворотно-поступальний рух паралельний напрямку поздовжньої подачі. Для забезпечення заданого типу регулярного мікрорельєфу, наприклад, з паралельними канавками, що не дотикаються деформуючі елементи-кульки 11 за допомогою ексцентричних стаканів 6 і внутрішніх ексцентричних втулок 8 розміщують так, щоб центри кульок знаходились в одній площині перпендикулярній поздовжній осі отвору 2 корпусу 1 і між ними був кут 120° .

Після здійснення проходу простого чи вібраційного обкочування із забезпеченням осциляційного руху, плоский трьохпрофільний кулачок 20

повертають за годинниковою стрілкою, при цьому периферійні ділянки цього кулачка 20 входять в контакт із циліндричними пальцями 2 і деформуючі елементи-кульки 11 розводять, заготовку 3 знімають і процес повторюють.

Таким чином використання запропонованого інструмента для чистового фінішного оброблення зовнішніх циліндричних поверхонь, реалізуючи метод поверхневого деформування дає можливість сформувати необхідний вид мікрорельєфу, забезпечити підвищену якість обробленої поверхні шляхом зменшення шорсткості, підвищення маслостійкості, твердості і зносостійкості, що безперечно є економічно ефективним і доцільним у виробництві.

6.8. Пристрій для формування регулярного мікрорельєфу на зовнішніх циліндричних поверхнях

В умовах дрібносерійного та ремонтного виробництва використання дорогих верстатів з числовим програмним керуванням є недоцільним у зв'язку з невеликими партіями оброблюваних деталей та високою потребою у переналагодженні верстатів для потреб виробництва. Тому при такій специфіці виробництва обґрунтованим є використання універсальних верстатів.

Для формування регулярних мікрорельєфів на таких верстатах доцільно використовувати спеціальні пристрої, які забезпечать формування регулярних мікрорельєфів на верстатах такого типу.

На рис. 6.16 наведено пристрій для формування регулярних мікрорельєфів на зовнішніх циліндричних поверхнях за допомогою універсальних токарних верстатів. Пристрій складається з шпинделя 1, в який встановлено оправку 2 з зубчастим колесом 3 меншого діаметра, яке є у зачепленні із блоком зубчастих коліс із зубчастим колесом 4 більшого діаметра та зубчастим колесом 5 меншого діаметра.

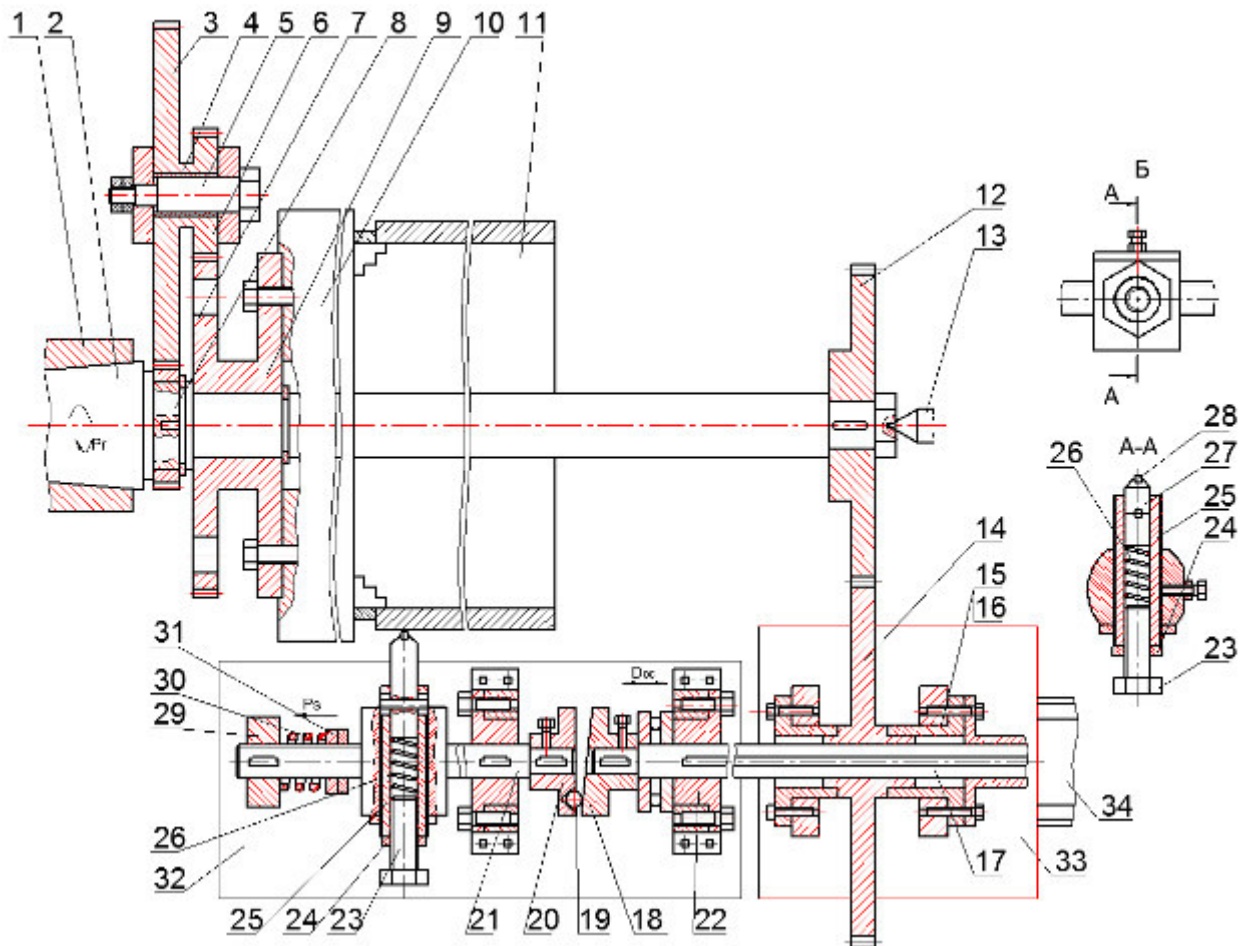


Рисунок 6.16 – Пристрій для формування регулярного мікрорельєфу на зовнішніх циліндричних поверхнях в умовах дрібносерійного виробництва

Цей блок зубчастих коліс розміщений на валу 6. Зубчасте колесо 6 є у зачепленні із зубчастим колесом 7, яке розміщене на валу 8 і виконане у вигляді планшайби 9, яка має кріпильні отвори, через які за допомогою гвинтів прикріплений патрон 10.

У патроні закріплена деталь 11 на зовнішню циліндричну поверхню якої необхідно нанести регулярний мікрорельєф.

На іншому кінці вала 8 розміщене зубчасте колесо 12, причому вал 8 закріплений у задньому центрі 13 верстату. Зубчасте колесо 12 є у зачепленні із зубчастим колесом 14, яке за допомогою корпуса 15 і втулки 16 розміщене з можливістю осевого переміщення на шліцевому валу 17. Причому на кінці цього шліцевого вала розміщений торцевий кулачок 18, який взаємодіє із кулькою 19 фланця 20, який розміщений нерухомо на валу 21. Шліцевий вал 17

закріплений з можливістю обертання в обоймі 22. Вал 21 розміщений з можливістю зворотньо-поступального руху. На ньому розміщений віброобкатник, який складається із регульовального гвинта 23, зафіксованого від самовільного переміщення гайкою 24, який загвинчений у втулку 25. Гвинт 23 тисне на пружину стиснення 26, яка переміщає шток 27, на кінці якого розміщений деформувальний елемент – кулька 28.

Вал 21 розміщений у обоймі 29, яка через пружину 30 і гайки 31 забезпечує його зворотньо-поступальний рух, паралельний осі оброблюваної деталі.

6.9 Висновки до шостого розділу

1. Запропоновано конструкцію адаптивного інструмента з самоустановлювальними інструментальними блоками для розточування внутрішніх циліндричних поверхонь з можливістю регулювання точності оброблених отворів. Розроблено методику розрахунку конструктивних параметрів та налаштування запропонованого інструментального оснащення для розточування внутрішніх циліндричних поверхонь на задану точність обробки в залежності від його конструктивних параметрів. Отримано графічні залежності мають практичну цінність і можуть бути використані при безпосередньому налаштуванні головки у виробничих підрозділах.

2. Запропонована нова конструкція інструмента для вібраційного обточування внутрішніх циліндричних поверхонь має суттєві відмінності новизни, позбавлена недоліків відомих аналогів. Отримані залежності дозволяють визначити конструктивні параметри інструмента для формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях оброблюваних деталей. У перспективі на їх основі може бути створене відповідне програмне забезпечення для автоматизованого розрахунку цих параметрів.

3. Запропоновано конструкцію інструменту для формування регулярних мікрорельєфів вібраційним обточуванням з двома рядами деформувальних

елементів, що забезпечує збільшення продуктивності операції формування РМР. Визначено умови формування різних типів регулярних мікрорельєфів багатокульковими інструментами на внутрішніх циліндричних поверхнях та отримано залежності для визначення конструктивних параметрів (відстань між деформувальними елементами, кут зміщення між їх рядами) багатокулькового інструменту та амплітуди його коливань для формування різних типів РМР.

4. Розроблено спосіб вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь, сліди оброблення яких паралельні твірній цих поверхонь. Даний спосіб враховує стохастичний характер мікронерівностей, напрям їх розміщення і забезпечує високу достовірність отриманих результатів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішено актуальну для технології машинобудування науково-прикладну проблему забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей машин у вигляді тіл обертання з урахуванням комплексного підходу та умов експлуатації шляхом оптимізації структури технологічних процесів за параметрами якості після кожної технологічної операції та забезпеченні прогресивних режимів обробки з допомогою статистичних методів оцінювання. При цьому фізико-механічні параметри якості, які забезпечують експлуатаційні властивості поверхонь, пропонується забезпечувати операціями ППД із формуванням регулярних мікрорельєфів.

Основні висновки, наукові й практичні результати роботи:

1. Проведено аналіз предметної області та встановлено:

– проектування технологічних процесів оброблення поверхонь класу «тіла обертання» в основному здійснюється шляхом включення технологічних операцій які забезпечують досягнення одного із параметрів якості поверхні, нехтуючи явищами технологічної спадковості, взаємного впливу цих параметрів між собою та умов експлуатації (для фінішних операцій технологічних процесів);

– встановлено наявність параметрів, характерних для поверхонь у вигляді тіл обертання, вплив яких на параметри якості може бути суттєвим, а ступінь цього впливу досі не виявлена, зокрема: розміри поверхні деталі класу «тіла обертання», характер поверхні (зовнішня/внутрішня), стохастичність подачі верстату та інші;

– встановлено, що оптимальною структурою технологічних операцій для формування якісних параметрів поверхонь тіл обертання є обробка різанням та подальше поверхневе пластичне деформування з формуванням регулярного мікрорельєфу. Причому структуру технологічних операцій та забезпечення якісних показників поверхонь тіл обертання слід здійснювати за комплексним

підходом до забезпечення параметрів якості поверхні з використанням ймовірнісного підходу та аналізом умов експлуатації.

2. Розроблено метод аналізу технологічної спадковості та обґрунтовано напрямки покращення точності форми поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь за теорією малих вибірок із врахуванням закону розподілу Релея відхилень від круглості. З використанням статистичних критеріїв оцінено ефективність технологічних операцій, що дозволило оптимізувати структуру оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь деталей машин.

3. Виконано кількісне оцінювання якості робочих поверхонь деталей машин за кривою Аббота-Фастерстоуна, отриманих після фінішних операцій технологічного процесу. Узагальнено закономірності впливу розмірів поперечних перерізів і форми циліндричних поверхонь (зовнішні і внутрішні) на параметр шорсткості R_a , зокрема зменшення діаметра оброблюваної поверхні збільшує математичне сподівання R_a . Встановлено, що усереднене математичне сподівання параметра R_a внутрішніх циліндричних поверхонь у 1,4 рази більше від аналогічного параметра зовнішніх циліндричних поверхонь за однакових режимів різання та геометричних параметрів інструменту.

Дослідження впливу подачі на шорсткість поверхні, сформованої точінням, дозволило встановити, що при обробленні пластичних матеріалів на малих подачах $0,02 \leq s \leq 0,075$ мм/об залежність R_a від осьової подачі s є практично незмінною, а при подачах $s > 0,075$ мм/об – монотонно зростаючою. Це дозволило підвищити продуктивність токарних операцій, зокрема забезпечення заданої конструктором шорсткості на подачах у 2–3 рази більших за мінімальні.

4. Вперше розроблено математичну модель динамічного процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні деталі, особливістю якої є те, що рельєфоутворення здійснюється зосередженою силою, точка прикладання якої відносно деталі змінюється у радіальному та осьовому напрямках та змодельована за допомогою дельта-функцій Дірака за

лінійною та часовою змінними. Встановлено, що форма мікронерівностей залежить не лише від кутової швидкості обертання деталі та складової привідного моменту, який активує її відносний коливальний рух, але й пружних коливань самого тіла. Отримані теоретичні результати динаміки процесу забезпечили встановлення основних закономірностей зовнішніх та внутрішніх резонансних явищ у пружних оброблювальних тілах та за $F=300$ Н, $R_d=60$ мм; $r_d=50$ мм, $l_d=1$ м; $V_s=0,01-0,05$ м/с; $E=2,4 \cdot 10^{11}$ Н/м² вказують на їх відсутність як для поздовжніх та і крутильних коливань.

5. Вперше запропоновано класифікацію ЧРМ сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання, на основі аналізу їх особливостей, яка дозволила за допомогою аналітичних залежностей описати характеристики канавок ЧРМ, сформованого на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання», що стало базою для розроблення множини варіантів канавок ЧРМ із використанням блочного підходу. Розроблені нові математичні моделі, які дозволили встановити елементи режиму формування й забезпечити необхідне значення відносної площі віброобкочування. При цьому вперше введено поняття кутового кроку канавки частково регулярного мікрорельєфу як параметра, який описує регулярність розміщення канавок ЧРМР на різній відстані від центра обертання торцевої поверхні тіла обертання.

6. Вперше розроблено спосіб формування частково регулярного мікрорельєфу, який забезпечує його однакову відносну площу на різній відстані від центра обертання торцевої поверхні тіла обертання. Отримано аналітичні залежності визначення необхідної величини амплітуди канавок V-подібної форми для мікрорельєфів I і II виду для забезпечення однакової відносної площі віброобкочування. Встановлено, що при формуванні ЧРМ на ділянках незначної ширини (менше 30 мм) амплітуду коливань можна приймати постійною, оскільки відносна площа віброобкочування при цьому зміниться менше ніж на 10 %. На поверхнях із значною площею віброобкочування доцільно здійснювати коригування амплітуди коливань для забезпечення стабільної величини відносної площі мікрорельєфу. Встановлено також

стадійність процесу перетинання канавок частково регулярного мікрорельєфу III виду та отримано аналітичні залежності й діапазони їх відповідності для визначення площі їх перекриття.

7. На основі результатів повнофакторного експерименту встановлено вплив зусилля деформування, швидкості подачі та осьового кроку канавок на середнє значення ширини канавки, сформованого на торцевій поверхні тіла обертання частково регулярного мікрорельєфу та шорсткість поверхні. Отримано регресійні залежності, поверхні відгуку та двомірні їх перерізи, які описують вплив цих параметрів на ширину канавки в межах встановлених при проведенні експерименту рівнів варіювання змінних факторів. Встановлено, що оптимальними режимами формування частково регулярного мікрорельєфу кулькою діаметром 4 мм на торцевих поверхнях досліджених тіл обертання зі сталі 45 є сила деформування $F_{d,i}=200\text{Н}$; $f_{in,i}=500$ мм/хв. Наведено режими формування для заготовки із вихідною шорсткістю поверхні $Ra=16$ мкм забезпечили значення висотного параметра шорсткості поверхні в межах $Ra=1$ мкм.

8. Розроблено конструкцію та методику розрахунку основних конструктивних параметрів дворіцевої адаптивної розточувальної головки. Розроблено конструкцію інструменту для формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях довгомірних циліндричних заготовок вібраційним обкочуванням та методику розрахунку основних конструктивних параметрів інструмента. Також визначено вплив розміщення деформувальних елементів на параметри регулярного мікрорельєфу. Розроблено кінематичну схему токарного верстата із жорстко зв'язаним кінематичним зв'язком для формування регулярних мікрорельєфів на довгомірних циліндричних поверхнях. Запропоновані технічні рішення були проваджені на ТОВ «ВКФ ДЗАК» – Дрогобицькому заводі автомобільних кранів – дворіцева адаптивна розточувальна головка та «ОСП Корпорація ВАТРА» – метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні, сформованої точінням.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Andrzej Dzierwa, Angelos P. Markopoulos. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines* 2019, 7, 11; doi:10.3390/machines7010011.
2. Applied Design of Experiments and Taguchi Methods - Kindle edition by Krishnaiah, K., Shahabudeen, P. PHI Learning Private Limited. New Delhi 2012. P. 362. ISBN-978-81-203-4527-0.
3. Assessment of Surface Texture; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996; 8p.
4. Barauskiene O., Zyhulia S.. Optimal control of the complex process of manufacturing cylindrical parts' printing equipment. *Технологія і техніка друкарства*. 2019. № 4(66). – p.42-55.
5. Bartarya, G., & Choudhury, S. K. (2014). Influence of machining parameters on forces and surface roughness during finish hard turning of EN 31 steel. *Proceedings of the Institution*.
6. Boothroyd G. Fundamentals Machining and Machine G. Tools. Boothroyd, W.A. Knight. – New York: Marcel Dekker, 1988. – 542 p.
7. Brammertz P. H. Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindrehen. – «Industrie-Anzeiger», 1961, 83, № 2.
8. Cao C., Zhu J., Tanaka T. (2020) Influence of Burnishing Process on Microstructure and Corrosion Properties of Mg Alloy AZ31. In: Itoh S., Shukla S. (eds) *Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_11.
9. Chen C.-C.A. A surface topography model for automated surface finishing./ C.-C.A. Chen, W.-C. Liu, N.A. Duffie// *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1998. – №38. – pp. 543-550.
10. Coba-Salcedo, Milton & Coral, Irene & Valencia, Guillermo. (2018). Characterization of surface topography with Abbott Firestone curve. *Contemporary Engineering Sciences*. 11. 3397-3407. 10.12988/ces.2018.87319.

11. Cveticanin L. Period of vibration of axially vibrating truly nonlinear rod. *Journal of Sound and Vibration*. 374, 199–210 (2016).
12. Cveticanin L., Pogany T. Oscillator with a sum of non-integer order nonlinearities. *Journal of Applied Mathematics*. 2012, Article ID 649050, 20 pages (2012).
13. Davidescu D.A., Pavelescu D., Tudor A., Seiciu L.P.. The importance of accuracy values of the abbotfirestone parameters curve for fractal and nonfractal calculus. *THE ANNALS OF UNIVERSITY “DUNĂREA DE JOS “OF GALAȚI FASCICLE VIII, 2004, Tribology*. pp.3-6.
14. Diltemiz S.F., Uzunonat Y., Kushan M.C., Celik O.N. Effect of dent geometry on fatigue life of aircraft structural cylinder part, *Engineering Failure Analysis*, (2009) 16 (4), pp. 1203-1207.
15. Dzyura V. Instrument for inner cylinder surfaces vibrating rolling and its structural parameters determination technique / Volodymyr Dzyura Petro Kryvyi, // *Вісник ТНТУ, – Т. : ТНТУ, 2016 – Том 82. – № 2. – С. 70-81. – (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки)*.
16. Dzyura V. Modeling of partially regular microreliefs formed on the end faces of rotation bodies by a vibration method. *UJMEMS*. 2020; Volume 6, Number 1: 30-38.
17. Dzyura V. O., Maruschak P. O., Zakiev I. M., Soroachak A. P. Analysis of Inner Surface Roughness Parameters of Load-carrying and Support Elements of Mechanical Systems. *IJE TRANSACTIONS B: Applications* Vol. 30, No. 8, (August 2017) 1170-1175.
18. Dzyura V., Kryvyi P., Tymoshenko N., Maruschak P., Nugaras J., Prentkovskis O. Probability-statistical estimation method of feed influence on as-turned finish of steels and non-ferrous metals. *Metals* 2018, 8, 965. DOI: 10.3390/met8110965.
19. Dzyura V., Maruschak P., Kozbur H., Kryvyi P., and Prentkovskis O., “Determining Optimal Parameters of Grooves of Partially Regular Microrelief

Formed on End Faces of Rotary Bodies,”*Smart and Sustainable Manufacturing Systems* 5, no. 1 (2021): 1–12. <https://doi.org/10.1520/SSMS20200057>.

20.Dzyura V.O., Kryvyi P.D., Tymoshenko N.M., Krupa V.V. Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces. Volume 2: Processing, Detroit, Michigan, USA, June 9–13, 2014, ISBN: 978-0-7918-4581-3. DOI: 10.1115/MSEC2014-3946.

21.Dzyura Volodymyr, Kryvyi Petro, Maruschak Pavlo, Panin Sergey, Lyashuk Oleh, Vlasov, Ilya. Influence of Curvature and Cross-sectional Shape of Cylindrical Surface Formed by Turning on Its Roughness. - *Arabian Journal for Science and Engineering*. - 2020/04/10. 2191-4281. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04512-8>.

22.Dzyura, V.; Maruschak, P.; Prentkovskis, O. Determining Optimal Parameters of Regular Microrelief Formed on the End Surfaces of Rotary Bodies. *Algorithms* 2021, 14, 46. <https://doi.org/10.3390/a14020046>.

23.Fang, N. and Srinivasa Pai, P., "Evaluation and Modeling of the Effect of Tool Edge Radius on Machined Surface Roughness in Turning UNS A92024-T351 Aluminum Alloy," *Journal of Testing and Evaluation*, <https://doi.org/10.1520/JTE20180279>. ISSN 0090-3973.

24.Gomez-Gras G, Travieso-Rodríguez JA, González-Rojas HA, Napoles-Alberro A, Carrillo F, Dessein G. Study of a ball-burnishing vibration-assisted process. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2014;229(1):172–7 .

25.Goutam D. Revankar, Raviraj Shetty, Shrikantha S. Rao, Vinayak N. Gaitonde, Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy. *Measurement*, Volume 58, 2014, Pages 256-268.

26.Hamdi, Amine. (2020). Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. *Archive of Mechanical Engineering*. 67. 73-95. [10.24425/ame.2020.131684](https://doi.org/10.24425/ame.2020.131684).

27.Hassan, A.M. The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals. *J. Mater. Process Technol.* 1997, 72, 385–391. [CrossRef]

28. <http://www.dak.com.ua/uk>
29. https://ozlib.com/822976/tehnika/mehanizm_obrazovaniya_poverhnostey_regulyarnym_mikrorelefom.
30. https://studref.com/591997/tehnika/regulyarnye_mikrorelefy_raznovidnosti
31. https://uk.wikipedia.org/wiki/Шорсткість_поверхні#cite_ref-1
32. ISO 13565-2:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties — Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve.
33. ISO 4288, Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface Texture: Profile Method-Rules and Procedures for the
34. ISO 8785 Surface Imperfections-Terms, Definitions, and Parameters; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1998; 20p.
35. John, M.R.S.; Wilson, A.W.; Bhardwaj, A.P.; Abraham, A.; Vinayagam, B.K. An investigation of ball burnishing process on CNC lathe using finite element analysis. *Simul. Model. Pract. Theory* 2016, 62, 88–101. [CrossRef]
36. Kryvyy P., Kryvinskyy P., Bodnar V., Sotnyk I., Senyk A.. "Theoretical and Experimental Substantiation of Angle Orientation of Rolling Bushings of Roller and Bushing Chains". Paper no. MSEC 2007-31211 International Manufacturing Science and Engineering conference. October 15-18, 2007, Atlanta, Georgia, USA, pp. 623-627.
37. Kryvyy Petro. Theoretical and Experimental Substantiation of Angle Orientation of Rolling Bushings of Roller and Bushing Chains / Petro Kryvyy, Petro Kryvinskyy, Volodymyr Bodnar, Iryna Sotnyk, Andrij Senyk // Paper no. MSEC 2007-31211 international Manufacturing Science and Engineering conference. – October 15-18, 2007, Atlanta, Georgia, USA. -pp. 623-627.
38. Kubatova, D. & Melichar, M. (2019). Roughness Evaluation Using Abbott-Firestone Curve Parameters, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0467-0475, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063.

39.Lacalle, Luis. (2012). Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. P.997-1003

40.Laheurte, Raynald & Darnis, Philippe & Darbois, Nathalie & Cahuc, Olivier & Neauport, Jérôme. (2012). Subsurface damage distribution characterization of ground surfaces using Abbott–Firestone curves. *Optics express*. 20. 13551-9. 10.1364/OE.20.013551.

41. Lin S.C. A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning/ S.C. Lin, M.F. Chang// *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1998. – №38. – pp. 763-782.

42.Luis N. López de Lacalle, A. Rodríguez, A. Lamikiz, A. Celaya & R. Alberdi (2011) Five-Axis Machining and Burnishing of Complex Parts for the Improvement of Surface Roughness, *Materials and Manufacturing Processes*, 26:8, 997-1003, DOI: 10.1080/10426914.2010.529589

43.Maohua Xiao, Xiaojie Shen, You Ma, Fei Yang, Nong Gao, Weihua Wei, and Dan Wu Prediction of Surface Roughness and Optimization of Cutting Parameters of Stainless Steel Turning Based on RSM Mathematical Problems in Engineering. Volume 2018, Article ID 9051084, 15 pages.

44.Nagit G., Slatineanu L., Dodun O., Ripanu M., Mihalache A. (2019). Surface layer microhardness and roughness after applying a vibroburnishing process. *Journal of Materials Research and Technology*. 8. 10.1016/j.jmrt.2019.07.044.

45.Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y. et al. Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. *Tribol Lett* 29, 241–252 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11249-008-9302-9>

46.Pawel Pawlus, Rafal Reizer, Michal Wieczorowski, Grzegorz Krolczyk, Material ratio curve as information on the state of surface topography–A review, *Precision Engineering*, Volume 65, 2020, Pages 240-258,

47.Pawlus, P.; Reizer, R.; Wieczorowski, M. Reverse Problem in Surface

Texture Analysis—One-Process Profile Modeling on the Basis of Measured Two-Process Profile after Machining or Wear. *Materials* 2019, 12(24), 4169; <https://doi.org/10.3390/ma12244169>.

48. Prediction of Surface Roughness and Optimization of Cutting Parameters of Stainless Steel Turning Based on RSM. Maohua Xiao, Xiaojie Shen, You Ma, Fei Yang, Nong Gao, Weihua Wei, Dan Wu. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering* Volume 2018, Article ID 9051084, 15 pages <https://doi.org/10.1155/2018/9051084>.

49. Preger K.-Th. Vorschläge für die Ermittlung der Schleifleistung und für eine ergänzende Kennzeichnung der Schleifscheiben. – «Werkstatt und Betrieb», 97, 1964, H9.

50. Radionenko, O., Kindrachuk, M., Tisov, O., & Kryzhanovskiy, A. (2018). Features of transition modes of friction surfaces with partially regular microrelief. *Aviation*, 22(3), 86-92. <https://doi.org/10.3846/aviation.2018.6204>.

51. Rao, P.N. *Manufacturing Technology: Metal Cutting and Machine Tools*; Tata McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2013; 521p.

52. Rîpă, Minodora & Deleanu (Tomescu), Lorena & Hapenciuc, Mioara & Crudu, Ion. (2003). Tribological characterisation of surface topography using abbot-firestone curve.

53. S. Wang, M. Tomovic, L. Hong *Commercial aircraft hydraulic systems*, Elsevier, Amsterdam (2016), pp. 53-60.

54. Sagbas, A. Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function. *Adv. Eng. Softw.* 2011, 42, 992–998. [CrossRef],

55. Sánchez Egea A.J., Rodríguez A., Celentano D., Calleja A., López de Lacalle L.N., Joining metrics enhancement when combining FSW and ball-burnishing in a 2050 aluminium alloy, *Surface and Coatings Technology*. Volume 367. 2019. Pages 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.010>

56. Shaw, M.C. *Metal Cutting Principles*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1984; pp. 487–519.

57.Slavov S., Dimitrov D., Iliev I. “Variability of regular relief cells formed on complex functional surfaces by simultaneous five-axis ball burnishing,” UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 2020, 82(3), pp. 195-206.

58.Slavov S., Iliev I. Design and FEM static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts, *Fiability & Durability*, ISSN 1844 – 640X, 2016, Nov 1(2).

59.Slavov, S.; Dimitrov, D.; Konsulova-Bakalova, M.; Vasileva, D. Impact of Ball Burnished Regular Reliefs on Fatigue Life of AISI 304 and 316L Austenitic Stainless Steels. *Materials* 2021, 14, 2529. <https://doi.org/10.3390/ma14102529>.

60.Slawomir Wos, Waldemar Koszela, Pawel Pawlus Comparing tribological effects of various chevron-based surface textures under lubricated unidirectional sliding. *Tribology International* 146 (2020) 106205 <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106205>.

61.Sokil B. I., Pukach P. Ya., Sokil M. B., Vovk M. I. Advanced asymptotic approaches and perturbation theory methods in the study of the mathematical model of single-frequency oscillations of a nonlinear elastic body. *Mathematical modeling and computing*, vol. 7, no. 2, pp. 269–277 (2020).

62.Stoyan D. Slavov, Diyan M. Dimitrov. A study for determining the most significant parameters of the ball-burnishing process over some roughness parameters of planar surfaces carried out on CNC milling machine. *MATEC Web of Conferences* 178, 02005 (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817802005>

63.Thomas M. Effect of tool vibrations on surface roughness during lathe dry turning process./ M. Thomas, Y. Beauchamp, A.Y. Youssef, J. Masounave// *Computers in Industrial Engineering*. – 1996. – №31. – pp. 637-644.

64.Toufatzis, A.I.; Pantazopoulos, G.A.; David, C.N.; Sagris, D.S.; Paipetis, A.S. Machinability of Eco-Friendly Lead-Free Brass Alloys: Cutting-Force and Surface-Roughness Optimization. *Metals* 2018, 8, 250.

65.Viacheslav Stadnychenko, Valeriy Varvarov, Results of Theoretical and Experimental Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems, *Advances in Materials*. Vol. 8, No. 4, 2019, pp. 156-165. doi:

10.11648/j.am.20190804.14

66. Volodymyr Hutsaylyuk, Iaroslav Lytvynenko, Pavlo Maruschak, Volodymyr Dzyura, Georg Schnell. A new method for modeling the cyclic structure of the surface microrelief of titanium alloy Ti6Al4V after processing with femtosecond pulses. *Materials* 2020, 13(21), 4983; <https://doi.org/10.3390/ma13214983>.

67. Wang, Shaoping; Tomovic, Mileta; and Liu, Hong, "Commercial Aircraft Hydraulic Systems: Shanghai Jiao Tong University Press Aerospace Series" (2015). Engineering Technology Faculty Books. 1, https://digitalcommons.odu.edu/engtech_books/1

68. X. P. Ouyang, F. Gao, H.Y. Yang, H.X. Wang Two-dimensional stress analysis of the aircraft hydraulic system pipeline, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering* 226(5):532-539, <https://doi.org/10.1177/0954410011413011>

69. Zdenko LIPA, Dagmar TOMANÍČKOVÁ. Utilisation of abbot-firestone curves characteristics for the determination of turned surface properties. *ANNALS OF FACULTY ENGINEERING HUNEDOARA – International Journal Of Engineering*. IX. 2011. p.223-226.

70. Zhang, Y., Zeng, L., Wu, Z., Ding, X. and Chen, K. (2019), Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston. *Micro Nano Lett.*, 14: 424-429. <https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5535>.

71. Zhang, Y., Zeng, L., Wu, Z., Ding, X. and Chen, K. (2019), Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston. *Micro Nano Lett.*, 14: 424-429. <https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5535>.

72. А.с. 203713 СССР МПК С21 D 39/00. Устройство для обработки плоских линейчатых поверхностей деталей / Ю.Г. Шнейдер, А.Н. Кравцов, И.Я. Персин, Г.Г. Теннинсон (СССР). – №1125636/22-1, Заявл. 05.01.1967, Опубл. 09.10.1967. Бюл. №21.

73. А.с. 313647 СССР МПК В24 D 39/02. Способ упрочнения поверхности металлических изделий / Ю.Г. Шнейдер, Г.Г. Лебединский (СССР). –

№1442838/25-27, Заявл. 25.05.1970, Опубл. 07.09.1971. Бюл. №27.

74. А.с. 319455 СССР МПК В24 D 39/00. Устройство для обработки плоских поверхностей виброобкатыванием / Ю.Г. Шнейдер, Ю.И. Мулин (СССР). – №1309524/25-8, Заявл. 21.11.1969, Опубл. 02.11.1971. Бюл. №33.

75. А.с. 415148 СССР МПК В24 В 39/00. Раскатник / О.П. Терехов, А.М. Правян (СССР). – №1730300/25-8, Заявл. 28.11.1971, Опубл. 17.07.1974. Бюл. №6.

76. А.с. 589111 СССР МПК В24 В 39/04. Инструмент для чистовой обработки наружных поверхностей / В.В. Корнев, А.А. Козырев, Л.Г. Одинцов (СССР). – №1442838/25-27, Заявл. 08.09.1976, Опубл. 25.01.1978. Бюл. №3.

77. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

78. Азаревич Г. М. Бернштейн Г. Ш. Исследование процесса чистовой обработки многороликовыми дифференциальными инструментами. В кн.: Размерно-чистовая обработка деталей пластическим деформированием взамен обработки резанием. - М.: НИИмаш, 1966.

79. Азаревич Г. М., Бернштейн Г. Ш. Чистовая обработка наружных цилиндрических поверхностей пластическим деформированием. -М.: ОНТИ, 1963. 73 с.

80. Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент: Изд. 3-е переработ. и допол. – М.: Машиностроение, 1975. – 440 с.

81. Афтаназів І. С. Дослідження динамічних характеристик вібраційно-відцентрового зміцнення довго вимірних циліндричних деталей / І. С. Афтаназів, Я. М. Литвиняк, Я. М. Кусий // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2004. – № 515 : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 55-64.

82. Афтаназів І. С. Дослідження динамічних характеристик вібраційно-відцентрового зміцнення довго вимірних циліндричних деталей / І. С. Афтаназів, Я. М. Литвиняк, Я. М. Кусий // Вісник Національного університету

«Львівська політехніка». – 2004. – № 515 : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 55-64.

83.Афтаназів І. С. Розрахунок енергії вібраційних зміцнювальних пристроїв з електромагнітним приводом та пружною системою / І. С. Афтаназів, В. В. Винник, Я. М. Кусий // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні / Державний університет "Львівська політехніка". – Львів : Видавництво Державного університету "Львівська політехніка", 2000. – Випуск 35. – С. 32–39.

84.Афтаназів І.С., Кусий Я.М. Аналіз та вибір оптимальних фінішних операцій технологічного процесу виготовлення довгомірних циліндричних деталей // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка ". - 2000. - № 412. - С. 3-11.

85.Афтаназів І.С., Кусий Я.М. Пристрій з електромагнітним приводом для зміцнення зовнішніх поверхонь довгомірних деталей // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – 1999. – № 359. – С. 36–41.

86.Афтаназів І.С., Кусий Я.М., Баранецька О.Р., Широков В.В. Вплив технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювального оброблення на фізичні параметри якості довгомірних циліндричних деталей із сталі 45 // Матеріали II Міжнар. наук.-техн. конф. “Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях”. – Славсько, 26 лютого – 1 березня 2002 р. – С. 114.

87.Афтаназів І.С., Кусий Я.М., Свіч А., Собачек А., Юрчишин І.І. Огляд технологій викінчувального оброблення довгомірних стержневих виробів // Вісник Житомирського інж.-технол. ін-ту. Спец. вип. за матеріалами II Міжнародної науково-технічної конференції “Процеси механічної обробки, верстати та інструменти”. – Житомир, 2001. – С. 60–68.

88.Барац, Я.И. Обработка поверхностей отверстий методом поверхностно-пластического деформирования с образованием регулярного микрорельефа / Я.И.Барац, Л.Р.Милованова // Металлообработка 2006. - № 3 - с. 28-34.

89. Башков В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1985. – 136 с.
90. Белов В. А. Исследование метода упрочнения плоскостей шариковыми головками и влияние его на эксплуатационные свойства поверхности. – Автореф. дис. . . канд. техн. наук. – Л. 1964.
91. Беловод А. И., Дудников И. А., Дудников А. А. Характер деформирования материала при вибрационном нагружении // Вібрації в техніці та технологіях. № 2 (54), 2009. – с. 5-8
92. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / Бобров В.Ф. – М. Машиностроение, 1975. – 344 с.
93. Болдин Л.А. Основы взаимозаменяемости и стандартизации в машиностроении М.: Машиностроение, 1984. – 2 изд. – 272 с.
94. Боярский В.Г. Самоустанавливаемость плавающего резцового блока в комбинированном инструменте при обработке на труборасточных станках // В.Г. Боярский, К.Т. Шеров, М.Р. Сихимбаев, В.Ф. Макеев. Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-2. – С. 414-418.
95. Браславский В. М. Отделка поверхностей крупных деталей обкатыванием цилиндрическими роликами. В кн.: Размерно-чистовая обработка деталей машин пластическим деформированием взамен обработки резанием. - М.: НИИмаш, 1965, С. 83-98.
96. Браславский В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами. 2-е изд. -М.: Машиностроение, 1975. - 159 с.
97. Валяев Ф.Ф. Исследование процесса дорнования отверстий тонкостенных деталей: Автореф. дис. – Ростов н/Д, 1972. – 22с.
98. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
99. Витенберг Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. / Ю. Р. Витенберг. – Л. : Судостроение, 1971. – 108 с.
100. Вовк Ю.Я. Самовстановлювальні інструментальні блоки з пружними зв'язками для обробки отворів : дис. на здобуття наук. ступеня канд.

техн. Наук : 05.03.01 / Вовк Юрій Ярославович; Терноп. держ. техн. ун-т ім. І.Пулюя. – Т., 2007. – 197 с.

101. Гаврилов А.Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении. Машиностроение. – Москва. – 567 с.

102. Гаврилюк В. Г., Кукляк М. Л. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання. Навчальний посібник для студентів механічних та машинобудівних спеціальностей. – К: УМКВО, 1990. – 210 с.

103. Гавриш А.П. Зміцнення металевих поверхонь деталей машин та механізмів / Гавриш А.П., Киричок П.О., Підберезний М.П. – Київ: Наукова думка, 1995. – 174 с.

104. Гаскаров Д.В. Малая выборка / Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. – М.: Статистика, 1978. – 248 с.

105. ГОСТ 16514-96 Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Общие технические требования. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ Дата введения 01.01.2002 (Докипедия: ГОСТ 16514-96 Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Общие технические требования).

106. ГОСТ 17574-72. Раскатки многошариковые жесткие дифференциальные диаметром от 40 до 300 мм для размерно-чистовой обработки отверстий деталей давлением. Технические требования (с Изменением N 1). Введ. 1973-07-01. М. : Изд.-во стандартов, 1983. – 10 с.

107. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей.– М. : Изд.-во стандартов, 1986. – 45 с.

108. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей.. [действителен от 1981.03.18]. – Международный стандарт СССР. Группа Г06. – М.: Изд.-во. ГОСТстандарт. – 1989. – с.45.

109. ГОСТ 24773-81 Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики. Введ. 1982–07–01. – М. : Изд.-во стандартов, 1988. – 14 с.

110. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. (СТ СЭВ 638-77). Взамен ГОСТ 2789-59. Введ.

1975-01-01. М. : Изд.-во стандартов, 1973. – 14 с.

111. ГОСТ 8908-81(СТСЄВ 178-75; СТСЄВ 513-77) Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные углы и допуски улов. Введ. 1982–01–01. – М. : Изд.-во стандартов, 1982. – 10 с.

112. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – М. : Стандартиформ, 2015. – 18 с.

113. ГОСТ17574-72. Раскатки многошариковые жесткие дифференциальные диаметром от 40 до 300 мм для размерно-чистовой обработки отверстий деталей давлением. Технические требования (с Изменением N 1). Введ. 1973-07-01. М. : Изд.-во стандартов, 1983. – 10 с.

114. Грановский Г.И. Резания металлов / Грановский Г.И., Грудов П.П., Кривцов и др. под ред. В.А. Кривоухова. – М.: Машгиз, 1954. – 472 с.

115. Грицай І.Є., Кривий П.Д., Дзюра В.О., Яцюк В.А. Ймовірнісний метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні, отриманої в процесі різання пластичних сплавів. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «прогресивні технології в машинобудуванні», (м. Львів, 2-6 лютого 2015 року) Львів, Львівська політехніка. 2015. – с.35-37.

116. Гуров Р.В. Основы проектирования инструмента для различных методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием. // Вестник Брянского государственного технического университета. 2006. № 2 (10). С.106-113.

117. Дельта–функция. “Математика” [электронный ресурс].URL: [https://math world.wolfram.com/ DeltaFunction.html](https://mathworld.wolfram.com/DeltaFunction.html).

118. Демаков И.П. Организация испытаний на надежность и обработка их результатов / И.П. Демаков, Ю.Г. Белазезян. – М. Машиностроение : 1974. – 56 с.

119. Демаков И.П., Потепун В.Е. Статистические методы определения законов распределения при анализе точности и надежности промышленных изделий по результатам эксперимента / И.П. Демаков, В.Е. Потепун. – Л. :

Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1970, 39 с.

120. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.

121. Дзыра Б. И. К вопросу обоснования метода усреднения для исследования одночастотных колебаний, возбуждаемых мгновенными силами / Дзыра Б. И. // Аналитические и качественные методы исследования дифференциальных и дифференциально-разностных уравнений. – Киев: Изд-во Ин-та математики, 1977. – С. 34-38.

122. Дзыра Б. И. О влиянии параметрической нагрузки импульсного вида на нелинейную колебательную систему / Дзыра Б. И., Ищук В. В. // Аналитические и качественные методы исследования дифференциальных и дифференциально-разностных уравнений. – Киев: Изд-во Ин-та математики, 1977. – С. 39-59.

123. Дзюра В.О. Визначення площі канавок трикутної форми частково регулярного мікрорельєфу, сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання / В. О. Дзюра // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2020. - № 2. - С. 62-67. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2020_2_10. DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-62-67.

124. Дзюра В.О. Вплив розміщення деформувальних елементів на параметри регулярного мікрорельєфу. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями технічних наук) Луцьк, 2017. Випуск 60. – с. 100-112.

125. Дзюра В.О. Імовірно-статистичний метод визначення впливу подачі і радіуса при вершині різця на шорсткість поверхні сформованої точінням. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 7-ї Міжнародної науково-практичної конференції 22-23 вересня 2016 року – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2016. — С. 91-92.

126. Дзюра В.О. Класифікація частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання. / В.О. Дзюра //

Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. - 2020. - Вип. 3(34). - С.129-135.

127. Дзюра В.О. Кривий П.Д. Прогресивна дворіцева адаптивна розточувальна головка. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2016. – № 3 (78) (2016) – с. 20-27.

128. Дзюра В.О. Статистическое оценивание отклонений от округлости свертных втулок приводных роликовых цепей. Международный инженерный журнал «Приводы и компоненты машин», 2015, №4-5.2015(17). Научно-исследовательское предприятие «Подъемтранссервис», 2015. – с. 10-14.

129. Дзюра В.О., Кривий П.Д. Дворіцева адаптивна розточувальна головка. Патент на винахід № 114667 В23В 29/03; заявлено 16.10.2015, опубліковано 10.07.2017, бюл. № 13.

130. Добротворский С. С. Методы прогнозирования шероховатости поверхности: обзор / С. С. Добротворский, Е. В. Басова. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" : зб. наук. пр. ; тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 41. – С.23–45.

131. Допуски и посадки: Справочник. В 2-х ч./ В.Д. Мягков, М.А. Палей. - 6 изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. – 543 с.

132. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч. Посібник / М. Дрожовець. – Львів : Ви-во Нац. унів. «Львівська політехніка», 2007. – 624 с.

133. ДСТУ 2413-94 «Вимірювання параметрів шорсткості. Терміни та визначення» – Введ. 1995–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 22 с.

134. ДСТУ ISO 286-1-2002 «Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилів та посадок». – Чинний від 2003–10–01. – Київ : Держстандарт, 2002. – 15 с.

135. Дудников А.А., Дудников И.А., Беловод А.И. Упрочнение поверхности деталей вибрационным методом / Вібрації в техніці та

технологіях. № 4 (56). 2009. – С.82-84

136. Дунин-Барковский, И. В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М. : Машиностроение, 1978. – 232 с.

137. Душинський В. В. Основи наукових досліджень. Теорія і практикум з програмним забезпеченням / Душинський В. В. – К. : НТУУ «КПІ», 1998. – 408 с.

138. Дьяченко П.Е. Исследование зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки, М.: АН СССР, 1949, 126 с.

139. Екимов В.В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. – Л.: Судостроение, 1966. – 328 с.

140. Жебровская-Луцик С. Методы определения формы цилиндрических деталей // Вестник машиностроения, 1980. №12. – с.41-49.

141. Зигуля С. М. Алгоритм керування комплексним технологічним процесом формування повністю регулярного мікрорельєфу / С. М. Зигуля // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2013. – № 4. – С. 40–47.

142. Исаев А.И. Микрогеометрия поверхности при токарной обработке. – М.-Л.: Издательство Академии Наук СССР, 1950. - 107 с.

143. Исаев А.Н. Упругое восстановление разметов отверстий после дорнования трубчатых заготовок // Вестник ДГТУ. 2004. Т.4. №4 (22). – С.437-442.

144. Исаев И.В. Исследование и оптимизация обработки гильз цилиндров двигателей ЗМЗ 24 методом ППД: Автореф. дис . канд. тех. наук. - Владимир, 1979.-19 с.

145. Капустян О.В. Екстремальні задачі. Теорія. Приклади. Методи розв'язування/ Капустян О.В., Перестюк М.О. Стенжицький О.М. // К.: ВПЦ Київ-унту. 2019.-71 с.

146. Киричек, А. В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьёв, А. Г. Лазуткин. – М. : Машиностроение, 2004. – 288 с.

147. Киричок П. О. Дослідження впливу параметрів мікрорельєфу на якість обробки деталі та експлуатаційні характеристики роліграфічного обладнання / П. О. Киричок, А. В. Несхозієвський // Технологічні комплекси / Вид-во Луцьк. нац. технол. ун-ту. – 2007. – № 3–4. – С. 74–80.

148. Киричок П. О. Класифікація пристроїв для оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / П. О. Киричок, І. В. Попов // Технологія і техніка друкарства : збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 2(32). – С. 181–185.

149. Киричок П. О. Програмне забезпечення з розрахунку процесів оздоблювально-зміцнюючої обробки циліндричних поверхонь / П. О. Киричок, О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2007. – № 3–4. – С. 80–85.

150. Киричок П. О. Технологічне забезпечення працездатності та надійності елементів та вузлів поліграфічних машин / П. О. Киричок // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2003. – № 1. – С. 71–79.

151. Киричок П.О. Комплексна оздоблювально-зміцнююча обробка циліндричних поверхонь/ П.О. Киричок, О.І. Хмілярчук // Машини і автоматизовані комплекси. – 2003 - №8

152. Киричок П.О. Методика визначення площі перекриття нерівностей при утворенні мікрорельєфів II та III видів при оздоблювально-зміцнюючій обробці / П. О. Киричок, О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства. – 2005. – № 2(8). – С. 73–78.

153. Киричок П.О. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей виробів при оздоблювально-зміцнюючій обробці. Киричок П.О. Автореферат дисертації на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук. – Київ, 1995. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Спец. 05.02.08 – Технологія машинобудування. – 32 с.

154. Киричок Т. Ю. Керування технологічними процесами оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / Т.

Ю. Киричок, В. Г. Олійник // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2007. – № 3–4. – С. 74–80.

155. Кирсанов С.В. Инструменты для обработки точных отверстий / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе, В.И. Кокарев. – М.: Машиностроение, 2005. – 336 с.

156. Клушин М.И. Резание металлов. Изд. Второе переработ. – М.: госнаучтехиздат машиностроительной литературы, 1958. – 454с.

157. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей / Колкер Я.Д. – К.: Техника, 1976. – 200 с.

158. Кочин А.Н., Желонкин М.В., Головин А.А.. Влияние регулярного микрорельефа на эксплуатационные показатели деталей машин. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 3(110). 2015. – с.104-109.

159. Кривий П., Дзюра В., Апостол Ю. Математичні моделі регулярних мікрорельєфів сформованих на зовнішніх повернях одночасно осцилюючими віброобкатниками. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (м. Тернопіль, 19-20 грудня 2012 року) Тернопіль, ТНТУ. 2012. – с.90-91.

160. Кривий П., Дзюра В., Тимошенко Н. Прогресивна технологія формування регулярних мікрорельєфів на довгомірних циліндричних поверхнях. Дванадцятий Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2015. – с. 85-86.

161. Кривий П., Дзюра В., Тимошенко Н., Апостол Ю. Статистичне оцінювання відхилень від круглості на основі гармонічного аналізу і теорії малої вибірки. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 55-річчю заснування ТНТУ та 170- річчю з дня народження І. Пулюя «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», (м. Тернопіль, 19-20 травня 2015 року) Тернопіль, ТНТУ. 2015. – с.97-98.

162. Кривий П., Крупа В., Дзюра В., Кушпіль В. Модернізація токарного верстата для оброблення отворів довгомірних циліндрів. Матеріали

Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 55-річчю заснування ТНТУ та 170- річчю з дня народження І. Пулюя «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», (м. Тернопіль, 19-20 травня 2015 року) Тернопіль, ТНТУ. 2015. – с.95-96.

163. Кривий П.Д. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П.Д. Кривий, В.В. Крупа // Вісник ЖДТУ. 2012. 2 (61)– С. 15-25.

164. Кривий П.Д. Трансформація пластичності зрізаного шару при свердлінні / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2009. – Вип. 25. – с.15-25.

165. Кривий П.Д., Крупа В.В., Дзюра В.О. Пристрій для вимірювання силових характеристик процесу різання при обробленні внутрішніх циліндричних поверхонь. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11–12 грудн. 2013.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2013. – С.102-103.

166. Кривий П.Д., Дзюра В.О. Обґрунтування конструктивних параметрів інструмента для формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції 31 травня – 3 червня 2016 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова, д-ра техн. наук – Краматорськ : ДДМА, 2016. – С. 46.

167. Кривий П.Д., Дзюра В.О. Підвищення якості гільз гідроциліндрів автомобільних кранів КТА-25. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції "Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів", (м. Одеса, 8-11 вересня 2015 року). – Одеса: Військова академія. 2015. – С.123 .

168. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Апостол Ю.О., Тимошенко Н.М. Спосіб вимірювання шорсткості циліндричної поверхні. Деклараційний патент на

корисну модель № 129762 G01B 21/30; заявлено 14.05.2018, опубліковано 12.11.2018, бюл. № 21.

169. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Дичковський М.Г. Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу віброобробкою на внутрішніх циліндричних поверхнях. Патент на винахід № 117380 В24В 39/02; заявлено 25.10.2017, опубліковано 25.07.2018, бюл. № 20.

170. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Кашуба Н.П. Інструментальна головка для оброблення деталей поверхневим пластичним деформуванням. XII всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Київ, 2012) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Націон. ун-тет. України "КПІ" [та ін]. – Київ : КПІ, 2012. – С.62-65.

171. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Крупа В.В., Тимошенко Н.М., Дубиняк Т.С. Визначення впливу подачі на шорсткість поверхні обробленої різанням. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (м. Тернопіль, 19-20 листопада 2014 року) Тернопіль, ТНТУ. 2014. – с.91-93.

172. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Апостол Ю.О. До питання вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь деталей машин. Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство. Міжнародна науково-технічна конференція, 21-22 вересня 2017 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. 2017. — С. 23-24.

173. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Кривінський П.П. Ймовірно-статистичний метод оцінювання відхилення від круглості на основі гармонічного аналізу і теорії малої вибірки. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. 5-та Міжнародна науково-практична конференція, 01-03 жовтня 2014 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія.

174. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Кривінський П.П. Метод визначення впливу кривизни обробленої поверхні сформованої

обточуванням та розточуванням на її шорсткість. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (м. Тернопіль, 25-26 листопада 2015 року) – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 135-136.

175. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М.. Вплив кривини циліндричної поверхні сформованої точінням або розточуванням на її шорсткість. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016) : матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції (26–29 квітня 2016 р., м. Чернігів). – Чернігів: ЧНТУ, 2016.– С. 80-82.

176. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимшенко Н.М. Статистичне оцінювання відхилень від круглості поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь згортних втулок приводних роликів ланцюгів. XV Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція "Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї-наука- виробництво", (Житомир, 04–07 листопада. 2015.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Житом. держ. техн. ун-т [та ін]. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – С.50-53.

177. Кривий П.Д., Крупа В.В., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М. Імовірно–статистичний метод дослідження сили різання при точінні. International research and practice conference “Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences” : Conference proceedings, December 27-28, 2017. p.101-104.

178. Кривий П.Д., Сенік А.А., Дзюра В.О., Кобельник В.Б.. Дослідження мікрогеометрії поперечних циліндричних перерізів циліндричних поверхонь на прикладі шкворневих втулок. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 7-ї Міжнародної науково-практичної конференції 22-23 вересня 2016 року – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2016. — С. 188-189.

179. Кривий П.Д., Тимошенко Н.М., Дзюра В.О., Кашуба Н.П. Імовірнісний підхід при визначенні відносної площі віброобробочування плоских

поверхонь. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11–12 грудн. 2013.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2013. – С.104.

180. Кривий П.Д.. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П.Д. Кривий, В.В. Крупа // Вісник ЖДТУ. 2012. 2 (61)– С. 15-25.

181. Крупа В. В. Металорізальні інструменти з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів : дис. канд. техн. наук, спец. 05.03.01 / Крупа Володимир Васильович - Тернопіль, 2015. - 185 с.

182. Кузьмин Ю. П., Помпеев К. П., Целищев А. А. Использование фрезерного станка с ЧПУ для нанесения регулярного микрорельефа на поверхности заготовки // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С.273-277.

183. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С. Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с/

184. Кусий Я. М. Прогнозування технологічних параметрів вібраційно-відцентрованого зміцнення деталей із конструкційних матеріалів / Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький, О. Т. Велика // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2007. – № 583. – С. 3–11.

185. Кусий Я. М. Стан та перспективи розвитку методів викінчувального оброблення довгомірних циліндричних деталей (огляд) / Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький, В. В. Широков // Наук. нотатки: міжвуз. зб. (за напрямом «Інж. механіка»).– Вип. 20. – Луцьк: Вид-во ЛДТУ, 2007.– С. 249-260.

186. Кусий Я.М. / Дослідження микрорельефу віброзміцнених втулок бурових pomp // Кусий Я.М., Топільницький В.Г., Василів Х.Б., 2011

187. Кусий Я.М. Технологічне забезпечення фізико-механічних параметрів поверхневих шарів металевих довгомірних циліндричних деталей

вібраційно-відцентровим зміцненням: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – Львів, 2002. – 260 с. – Рукопис.

188. Кусий Я.М., Баранецька О.Р. Аналіз впливу технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювального оброблення на фізичні параметри якості довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2002. – № 442: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – С. 43–52.

189. Кусий Я.М.. Дослідження впливу режимів вібраційно-відцентрового зміцнення на геометричні параметри якості поверхні довгомірних циліндричних деталей / Я.М. Кусий, В.Г. Топільницький // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів : Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Вип. 43. 2009. – Вип. 43. – С. 44-51.

190. Лепихов В.Г. Самоустанавливающиеся инструменты / В.Г. Лепихов – М.: Машиностроение, 1974. – 80 с.

191. Лешенкова Л.Р. Повышение производительности процесса и улучшение эксплуатационных свойств отверстий методом пластического деформирования с образованием регулярного микрорельефа: дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.03.01. «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Л.Р. Лешенкова. – Саратов, 2002. – 18 с.

192. Личковаха Андрей Сергеевич. Повышение качества финишной обработки ремонтируемых гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.03.- зерноград, 2006.- 212 с.

193. Лотоцька О. І. Комплексна технологія формування микрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин : дис. ...канд. техн. наук : 05.05.01 / Лотоцька Оксана Іванівна. – Київ, 2012. – 179 с.

194. Лотоцька О. І. Теоретичні розрахунки опорної площі на циліндричних поверхнях деталей поліграфічного обладнання / О. І. Лотоцька //

Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2011. – № 2. – С. 66–72.

195. Лотоцька О. І. Узагальнена класифікація пристроїв та інструменту для виконання вібраційного обкатування на деталях поліграфічного обладнання / О. І. Лотоцька // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2014. – № 2. – С. 112–123.

196. Лукьянов В. С. Параметры шероховатости поверхности / В. С. Лукьянов, Я. А. Рудзит. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 162 с.

197. Луців І. Формування шорсткості і хвилястості поверхні при багатолезовій адаптивній обробці / І. Луців // Вісник Тернопільського державного технічного університету, 1999, т.4, №3, с.135-138.

198. Луців І.В. Порівняльна характеристика процесу самовстановлювання чотирилезового інструменту для зенкерування отворів та існуючих самовстановлюваних інструментів / І.В. Луців Ю.Я. Вовк // Матеріали 3-ї Всеукраїнської конференції: «Современные металлорежущие системы машиностроения». – Донецьк, 2002. – С.78-82.

199. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение на Украине // Сучасне машинознавство. 1999. № 1/99. С.99–104.

200. Маркович Б.М. Рівняння математичної фізики. Навчальний посібник. Львів: Вид-во Львівської політехніки.-2010.-384с.

201. Марущак П.О., Дзюра В.О., Литвиненко Я.В. Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу. Деклараційний патент на корисну модель № 141520 В24В 39/00; заявлено 21.10.2019, опубліковано 10.04.2020, бюл. № 7.

202. Марущак П.О., Литвиненко Я.В., Дзюра В.О. Спосіб визначення параметрів профілограми. Деклараційний патент на корисну модель № 142750 G01В 21/30; заявлено 02.01.2020, опубліковано 25.06.2020, бюл. № 12.

203. Маталин А.А. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства деталей. // Вестник машиностроения. - №11. - 1968.- 234 с.

204. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / Маталин А.А. – К.: Техника, 1971. – 142 с.

205. Мельников П.А. Математическая модель формирования микрорельефа шейки вала при обработке алмазным выглаживанием. П.А. Мельников, А.Н. Пахоменко, А.А. Лукьянов. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. № 2 (32-2). – с.104-111.

206. Митропольский Ю. А. Асимптотические решения уравнений в частных производных / Ю. А. Митропольский., Б. И. Мосеенков. – Киев: Вища школа, 1976. – 584 с.

207. Моргунов А. П., Глушец В. А., Стрек Я. М.. Моделирование процесса формирования многоуровневого микрорельефа поверхностным пластическим деформированием. Омский национальный вестник. – №3 (36). – 2006. – с. 79-85.

208. Нагоркин Максим Николаевич. Надёжность технологического обеспечения шероховатости и износостойкости поверхностей деталей инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов: автореферат дис. ... доктора Технические наук: 05.02.08 / Нагоркин Максим Николаевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»], 2020.

209. Нагоркин, М. Н. Оценка влияния технологической наследственности на процесс формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием / М. Н. Нагоркин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – № 5. – С. 125-130.

210. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Одинцов Л.Г. – Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

211. Олейник О. А. Лекции об уравнениях с частными производными / О. А. Олейник. – Москва: Бином, 2005.– 60 с.

212. П.Д. Кривий, В.В. Крупа, Н.М. Тимошенко, А.І. Гураль. Математичні моделі регулярних мікрорельєфів на робочих евольвентних

поверхнях циліндричних прямозубих коліс. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27–28 листоп. 2019.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. с.100-101.

213. Павловський М. А. Теоретична механіка. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.

214. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

215. Патент на винахід № 112248, Україна. Спосіб визначення впливу подачі на шорсткість оброблюваної поверхні різанням / Кривий П.Д., Дзюра В.О., Грицай І.Є., Яцюк В.А., заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201503041. Заявл. 02.04.2015, Опубл. 10.08.2016, бюл. № 15. – 13с.

216. Патент на винахід № 114667. Дворіздева адаптивна розточувальна головка. Україна МПК В23В 29/03 (2006.01), С2 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201510127. Заявл. 16.10.2015, Опубл. 10.07.2017, бюл. № 13. – 10с.

217. Патент на винахід № 118890, Україна МПК В24В 39/00. Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням. Дюра В.О. (2017.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201702296. Заявл. 13.03.2017, Опубл. 25.03.2019, бюл. № 6. – 19с.

218. Патент на винахід №108691. Інструмент для чистового фінішного оброблення зовнішніх циліндричних поверхонь. Україна МПК В24В 39/04 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а 201311875. Заявл. 09.10.2013, Опубл. 25.05.2015, бюл. № 10. – 9с.

219. Патент на корисну модель 99316. Дворіздева розточувальна головка. Україна В23В 29/03 (2006.01)), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. –

u201414109. Заявл. 29.12.2014., Опубл. 25.05.2015., Бюл. №10 – 8с.

220. Патент на корисну модель № 103173., Інструмент для чистового фінішного оброблення циліндричних поверхонь. Україна МПК (2015.01) В24В 39/00, заявник і власник патенту патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u2015 04499. Заявл. 08.05.2015., Опубл. 10.12.2015, Бюл.№ 23.

221. Патент на корисну модель № 105545. Валик для дослідження шорсткості оброблюваної поверхні. Україна МПК G01N 33/20 (2006.01), заявник і власник патенту патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u 2015 09039. Заявл. 21.09.2015., Опубл. 25.03.2016, Бюл.№ 6. – 5с.

222. Патент на корисну модель № 106945. Дворіцева розточувальна головка з торсіонним гасником коливань. Україна МПК (2015.01) В23В 29/03, заявник і власник патенту патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u 2015 11856. Заявл. 30.11.2015., Опубл. 10.05.2016, Бюл.№ 9. – 9с.

223. Патент на корисну модель № 10734. Україна. МПК В24В 39/00 (2009). Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу / Киричок П.О., Хмілярчук О.І. заявник і власник патенту Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – № и200505560. Заявл. 10.06.2005, Опубл. 15.11.2005, бюл. № 11

224. Патент на корисну модель № 109558. Спосіб формування регулярного мікрорельєфу на частково-циліндричних поверхнях. Україна МПК (2016.01) В23В 29/0 В24В 39/00 В21Н 3/00, заявник і власник патенту патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u 2015 02385. Заявл. 30.11.2015 12.03.2016., Опубл. 25.08.2016, Бюл.№ 16. – 4с.

225. Патент на корисну модель № 111018. Спосіб визначення впливу кривизни на шорсткість обробленої поверхні. Україна. МПК (2015.01) G01В 21/30, заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u 2016 04782. Заявл. 28.04.2016., Опубл.

25.10.2016, Бюл.№ 20. – 16с.

226. Патент на корисну модель № 121078. Самоцентруючий трикулачковий патрон. Україна МПК В23В 31/02 (2006.01), В23В 31/10 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201705783. Заявл. 12.06.2016, Опубл. 27.11.2017, бюл. № 22. – 4с.

227. Патент на корисну модель № 121381. Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням. Україна МПК В24В 39/00 (2017.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u 2017 02298. Заявл. 13.03.2017, Опубл. 11.12.2017, бюл. № 23. – 19с.

228. Патент на корисну модель № 129762, Україна МПК G01В 21/30 (2006.01). Спосіб вимірювання шорсткості циліндричної поверхні. Дзюра В.О. Кривий П.Д., Апостол Ю.О., Тимошенко Н.М. № u 2018.05.305. Заявл. 14.05.2018, Опубл. 12.11.2018, бюл. № 21. – 5с.

229. Патент на корисну модель № 139790, Україна МПК В24В 39/00 (2006.01). Спосіб формування частково-регулярного мікрорельєфу на циліндричних поверхнях вібраційним обкочуванням заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201905989. Заявл. 30.05.2019, Опубл. 27.01.2020, бюл. № 2. – 5с.

230. Патент на корисну модель № 55748. Україна. МПК В24В 39/00 (2009). Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу / Киричок П.О., Лотоцька О.І. заявник і власник патенту Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – № u201006779. Заявл. 01.06.2010, Опубл. 27.12.2010, бюл. № 24

231. Патент на корисну модель № 94045. Головка для формування регулярних мікрорельєфів вібраційним обкочуванням. Україна МПК (2014.01) В24В 39/00, заявник і власник патенту патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u2014 05285. Заявл. 19.05.2014., Опубл. 27.10.2014, Бюл.№ 20. – 5с.

232. Патент на корисну модель №101187. Дворіздева розточувальна головка. Україна МПК В23В 29/03 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201503042. Заявл. 02.04.2015., Опубл. 25.08.2015, бюл. №16.

233. Патент на корисну модель №86461. Інструмент для чистової обробки поверхневим пластичним деформуванням. Україна МПК В24В 39/04 (2006.01), заявник і власник патенту Кривий П.Д., Кашуба Н.П., Дзюра В.О., Кобельник В.Р. – № u201309722. Заявл. 05.08.2013., Опубл. 25.12.2013, бюл. № 24. – 5с.

234. Патент на корисну модель №93918. Дворіздева розточувальна головка. Україна МПК В23В 29/03 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u2014 03726. Заявл. 10.04.2014., Опубл. 27.10.2014, бюл. № 20. – 7с.

235. Патент на корисну модель №94017. Дворіздева розточувальна головка. Україна МПК В23В 29/03(2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u 2014 04963. Заявл. 12.05.2014., Опубл. 27.10.2014, Бюл.№ 20– 7с.

236. Перестюк М.О. Деякі сучасні аспекти асимптотики теорії диференціальних рівнянь з імпульсною дією / Перестюк М.О., Чернікова О.С. // Укр. мат. журн. – 2008. – 60, с. 81-90.

237. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / [К. Хартан, Э. Лецкий, В. Шефер и др.] ; [перевод с немецкого].– М. : Мир, 1977. – 552 с.

238. Погодаев В.П. Технологическое обеспечение параметров поверхностей с частично регулярным микрорельефом деталей пар трения [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08 - Технология машиностроения / В. П. Погодаев ; ОмГТУ. – Омск, 2004. – 16 с.

239. Попандопуло К.Х. Формирование качественных показателей поверхностного слоя, гильз цилиндров двигателя ЗМЗ-53, при его раскатывании методом осциллирующих переменных давлений / К.Х.

Попандопуло, В.В. Усов, А.С. Личковаха // Технологии и средства повышения надежности машин в АПК. - зерноград, 2006. - Вып. 2. -С. 52-58.

240. Прогрессивные инструменты для обработки отверстий поверхностным пластическим деформированием роликами / Г. С. Жетесова, Я. Н. Отений, О. П. Муравьев Ю. О. Муравьева // Горно-металлургический комплекс Казахстана: проблемы и перспективы инновационного развития : тр. Междунар. науч.-практ. конф., посв. 20-летию Независимости Казахстана, г. Караганды, 29-30 нояб. 2011г. Ч. 2 / Министерство образования и науки Республики Казахстан, Карагандинский государственный технический университет. - Караганда, 2011. - С. 179-182.

241. Проскуряков Ю.Г. и др. Объемное дорнование отверстий / Ю.Г. Проскуряков, В.Н. Романов, А.Н. Исаев – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

242. Проскуряков Ю.Г. Чистовая обработка деталей пластическим деформированием [Текст] / Ю. Г. Проскуряков, А. И. Осколков, Б. Г. Шаповалов [и др.]. – Барнаул : Алт. кн. изд-во, 1969. – 105 с.

243. Проскуряков Ю.Г., Шельвинский Г.И. Дорнование цилиндрических отверстий с большими натягами. – Ростов н/Д: РГУ, 1982. – 166 с.

244. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 330 с.

245. Романовский П.И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. преобразования Лапласа [Текст] / П.И. Романовский.- М.: Наука, 1980.- 336 с.

246. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Рыжов Э.В., Суслов А.Т., Федоров В.П. – М.: Машиностроение, 1979. Библиотека технолога. – 176 с.

247. Свідоцтво № 100743 Україна. Комп'ютерна програма. «Моделювання реалізації мікрорельєфу» . Я.В. Литвиненко, П.О. Марущак, В.О. Дзюра; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.

248. Свідоцтво № 96138 Україна. Комп'ютерна програма “Визначення

параметрів мікронерівностей поверхні металів. «Analiz relefu» / Я.В. Литвиненко, П.О. Марущак, В.О. Дзюра; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.

249. Справочник контролера машиностроительного завода. Допуски, посадки, линейные измерения. Под ред. А.И. Якушева. 2-ое издание. М., "Машиностроение", 1970

250. Справочник контролера машиностроительного завода. Под ред. А.И. Якушева. 3-ое издание. – М.: Машиностроение, 1980. - 527 с.

251. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х т. Т.1 / Под. ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с.

252. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин обработкой пластическим деформированием / Приложение №8 к журналу «Справочник. Инженерный журнал» №8 – 2003.

253. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховалость, волнистость, профиль. Международный опыт. / Под. ред. канд. техн. наук Н.А. Табачниковой. СПб.: Политехн. ун-та., 2007, 136 с.

254. Ткачук А.А., Заблоцкий В.Ю., Дзюра В.О. Підвищення зносостійкості фрикційних поверхонь обертання методами поверхневого пластичного деформування. Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – №5 (2). - с. 158-163.

255. Точность производства в машиностроении и приборостроении. Под ред. А.И. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567с.

256. Фельдман Я.С. Расчет параметров микрорельефа цилиндрических вибронакатанных поверхностей деталей машин, приборов и их технологическое обеспечение / Я.С. Фельдман. – Л.: ЛИТМО, 1979. – 97 с.

257. Феодосьев В.И., Соппротивлени материалов: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1970. – 544 с.

258. Филоненко С.Н. Резание металлов / С.Н. Фмлоненко. – К.: Техника, 1975. – 232 с.

259. Функциональная взаимозаменяемость в машиностроении [Текст] : научное издание / Ю. Н. Ляндон ; общ. ред. А. И. Якушев. М. : Машиностроение, 1967. 219 с.
260. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах [Текст] / Г. Хан, С. Шапиро. М.: Мир, 1969. – 395 с.
261. Хмілярчук О. І. Пристрої та інструмент для виконання віброобробки на деталях поліграфічного обладнання / О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства. – 2006. – № 1–2 (11–12). – С.133–137.
262. Хусу А. П. Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов. / М. : Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975. – 344 с.
263. Ціж Б.Р., Сокіл Б.І., Сокіл М. Б. Теоретична механіка: Підручник: – Львів: Сполом, 2008. – 458 стор.
264. Чирков Г.В. Технология получения высококачественных поверхностей отверстий в деталях автомобильных двигателей и других механизмов / Г.В. Чирков // Двигателестроение. - 2001. - №3. - С. 14-15.
265. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1972. – 241 с.
266. Шнейдер Ю.Г. Инструмент для чистовой обработки металлов давлением. – Л.: Машиностроение, 1971. – 134 с.
267. Шнейдер Ю.Г. Исследование влияния маслоёмкости рабочих поверхностей гильз цилиндров автомобильных двигателей на их прирабатываемость / Ю.Г. Шнейдер, Г.Г. Лебединский // Упрочняюще-калибрующие и формообразующие методы обработки деталей. - Ростов-на-Дону, 1970. - С.92-93.
268. Шнейдер Ю.Г. Регуляризация и упрочнение поверхностей деталей машин / Вестник машиностроения. 1984. 12. – с. 18-20.
269. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Ю.Г. Шнейдер. – Л. :

Машиностроение, 1982. – 248 с.

270. Экимов В. В. Вероятностные методы в строительной механике корабля / Екимов В.В. – «Судостроение». – Ленинград, 1966. – 328с.

271. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник. – 5-е изд. перераб. и доп. / А.И. Якушев – М.: Машиностроение, 1979. – 343 с.

272. Ящерицын П.И., Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Авелчеников. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256с.

ДОДАТКИ



ПРОТОКОЛ
 намірів про науково-технічне співробітництво

м. Дрогобич

28 серпня 2012 р.

Присутні представники:

від ПАТ ДЗАК: технічний директор Якимів Михайло Васильович;
 головний технолог Пакош Тарас Йосипович;
 начальник управління головного конструктора Заморило
 Андрій Петрович.

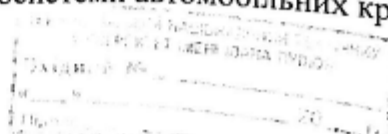
від ТНТУ: начальник науково-дослідної частини к.т.н., доц. Дзюра
 Володимир Олексійович;
 к.т.н., проф. кафедри конструювання верстатів,
 інструментів та машин Кривий Петро Дмитрович;
 к.т.н., доц. кафедри автоматизації технологічних процесів
 Ляшук Олег Леонтійович;
 аспірант кафедри ВІ Кашуба Назар Петрович.

СЛУХАЛИ:

1. Інформацію к.т.н., проф. Кривого П.Д. про виконані кафедрою ВІ науково-дослідні роботи з тематики конструкторсько-технологічних методів забезпечення якості промислової продукції.
2. Інформацію начальника науково-дослідної частини к.т.н., доц. Дзюри В.О. про тематику держбюджетних науково-дослідних робіт в галузі машинобудування.
3. Інформацію технічного директора ПАТ ДЗАК Якімова М.В. про організаційні та конструкторсько-технологічні заходи щодо забезпечення якісних параметрів автомобільних кранів.
4. Пропозицію к.т.н., проф. Кривого П.Д. щодо об'єднання зусиль для впровадження нових прогресивних технологій у виробництво автомобільних кранів.

УХВАЛИЛИ:

1. ТНТУ запропонувати ДЗАК спільно здійснити ряд попередніх досліджень якісних параметрів деталей гідросистеми автомобільних кранів.



2. На виконання п.1 цього Протоколу ТНТУ і ДЗАК будуть збирати і надавати у користування учасникам протоколу без права власності необхідну не конфіденційну інформацію, отриману від спільної діяльності.

3. За необхідності здійснювати спільні експериментальні дослідження на дослідних зразках ДЗАК за методикою ТНТУ.

4. При виявленні ознак новизни в отриманих технічних рішеннях захищати права інтелектуальної власності визначеними законодавством методами.

5. За наявності позитивних результатів висловлювати намір щодо укладання в майбутньому договорів про співпрацю на основі цього протоколу.

6. Для прийняття кінцевого рішення про можливість використання отриманих результатів у виробництво уповноважені представники ДЗАК і ТНТУ зустрічаються за домовленістю.

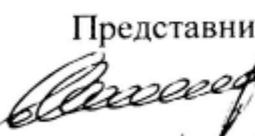

7. Цей протокол є попередньою домовленістю і не накладає певних фінансових і юридичних зобов'язань на ДЗАК і ТНТУ.

Реквізити:





ПАТ «Дрогобицький завод
автомобільних кранів»
вул.Гайдамацька,22, м.Дрогобич
82100, Львівська обл.
тел. (03244) 9-65-12
факс: (03244) 9-65-60

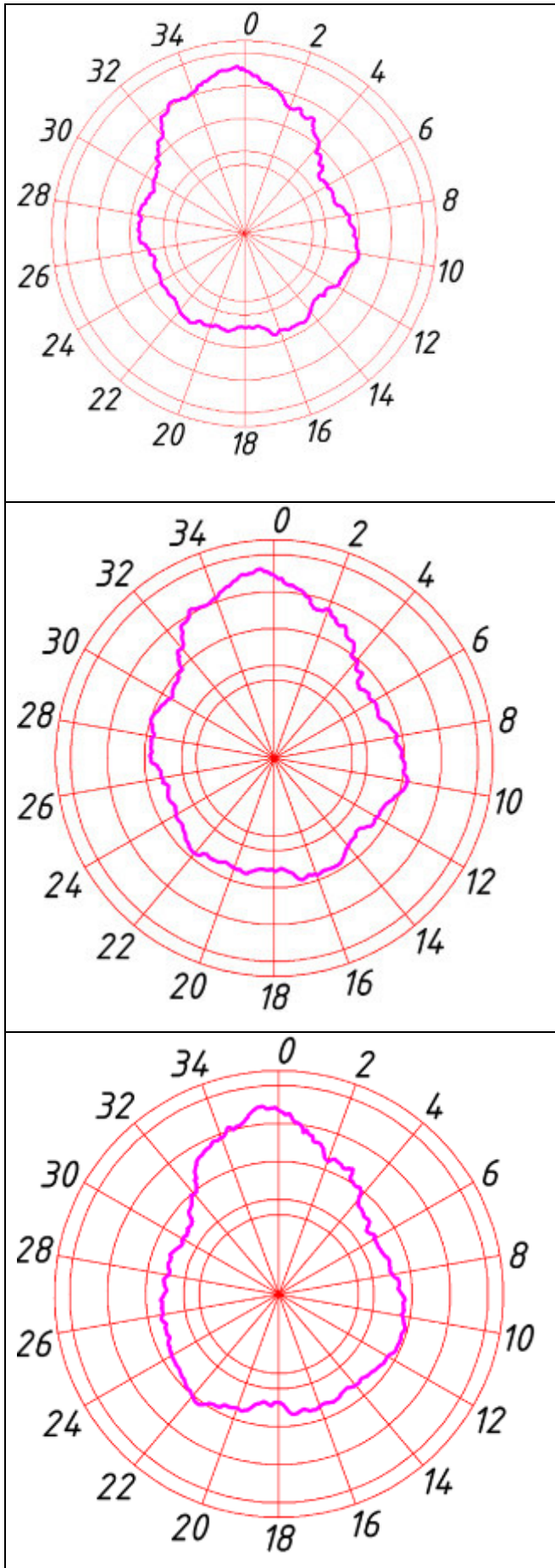
Тернопільський національний
технічний університет імені
Івана Пулюя
вул.Руська,56, м.Тернопіль
тел. (0352) 52-41-81
факс: (0352) 25-49-83

Представники від ДЗАК:

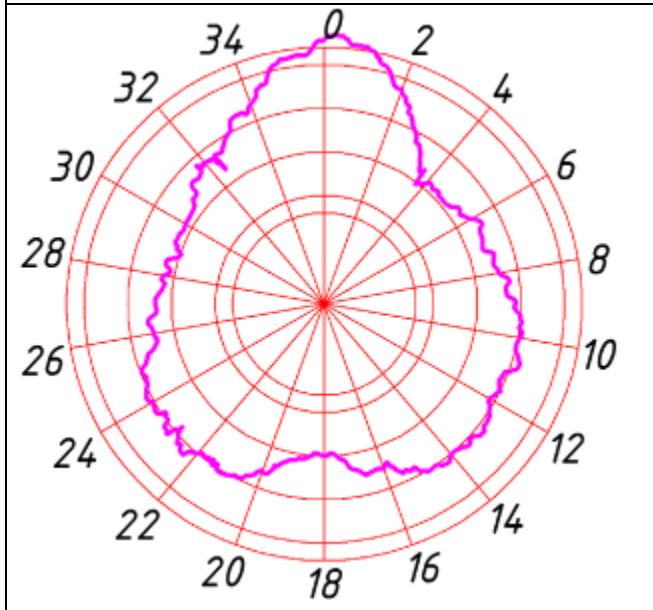
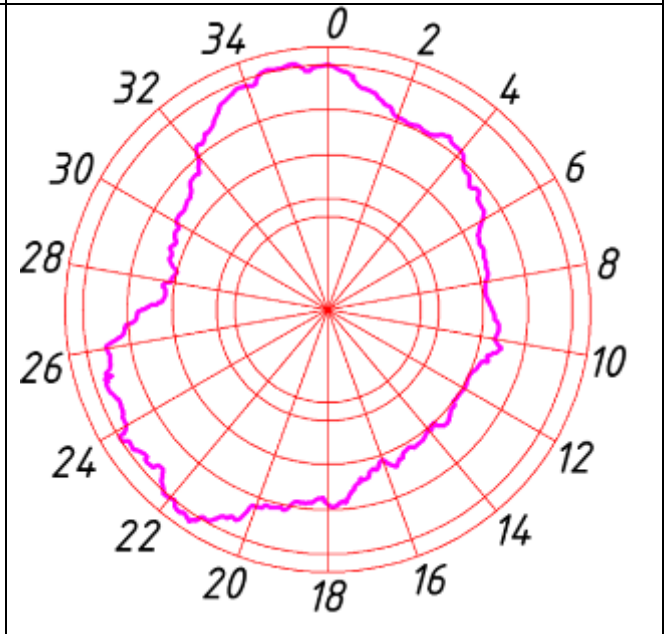
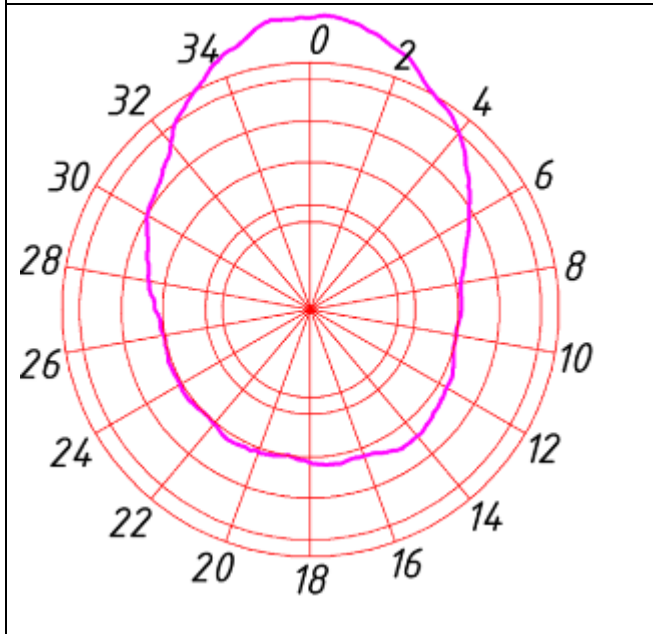
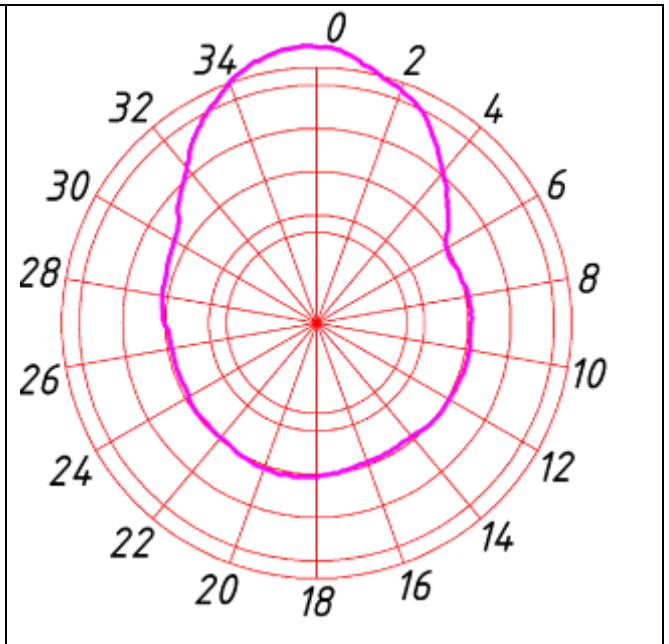
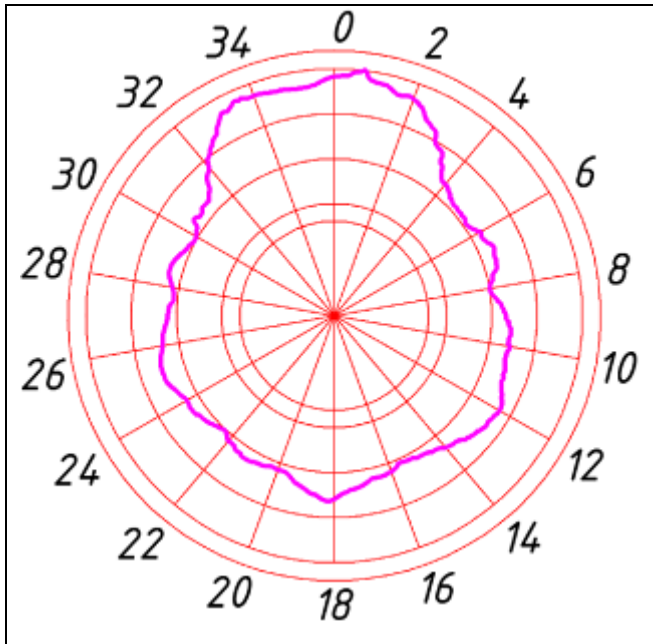
 Якимів М.В.
 Пакош Т.Й.
Заморило А.П.

Представники від ТНТУ:

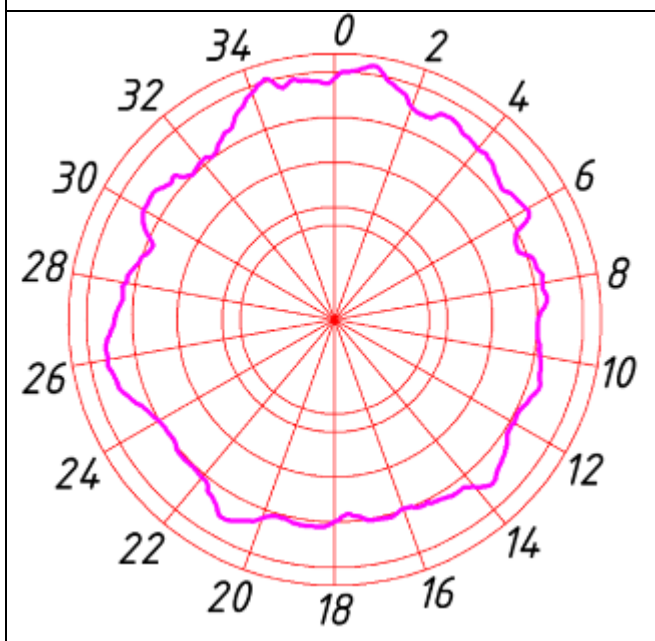
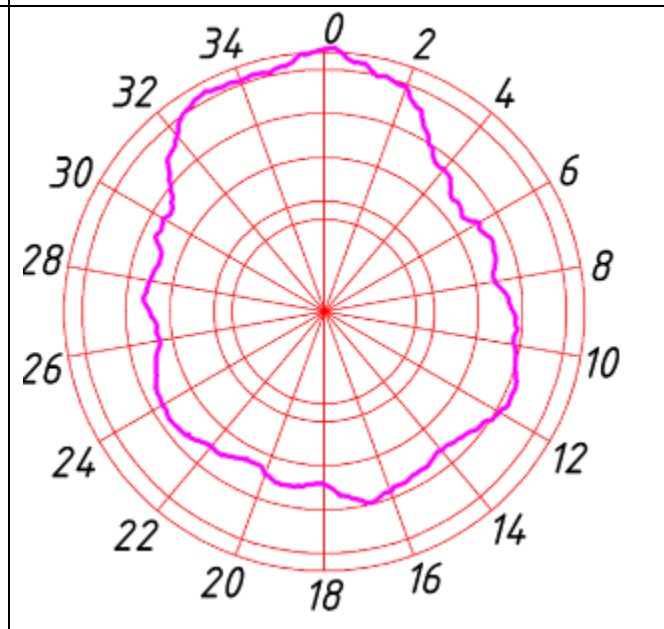
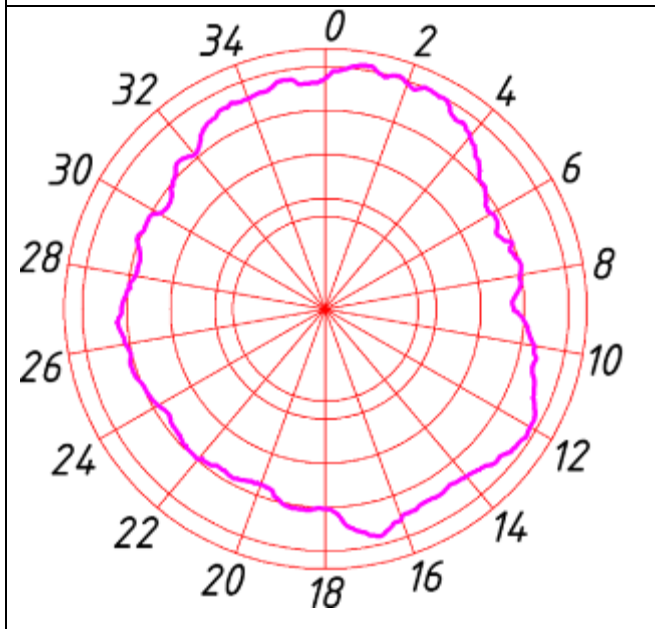
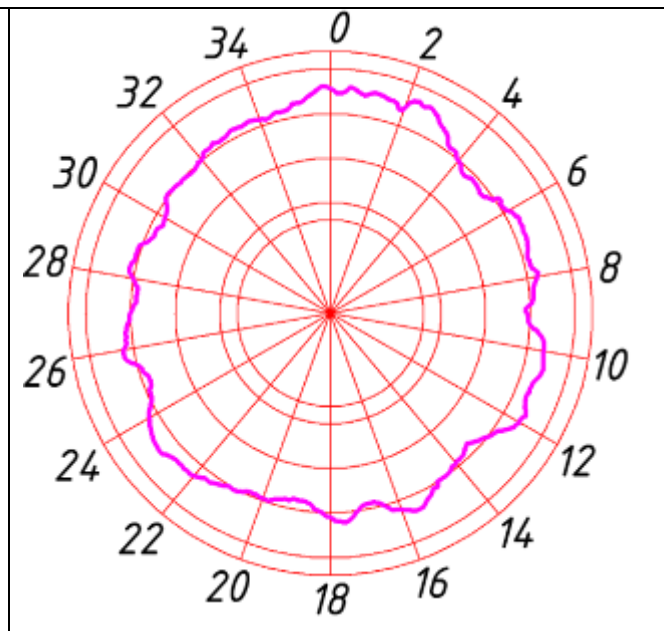
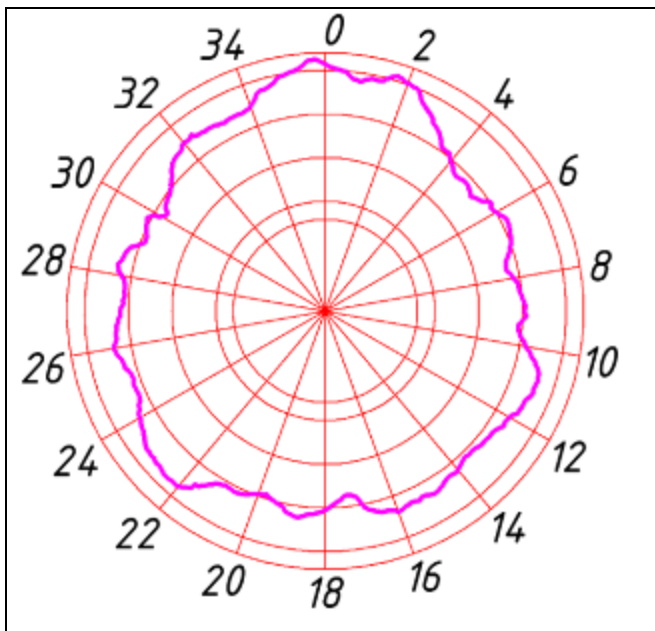
 Дзюра В.О.
 Кривий П.Д.
 Ляшук О.Л.
 Кашуба Н.П.



Профілограми внутрішньої
циліндричної поверхні гільзи циліндра
гідроциліндра КС-4574.63.900-05
піднімання стріли автокрана КТА-25
після чорнової обробки



Профілограми внутрішньої
циліндричної поверхні гільзи циліндра
гідроциліндра КС-4574.63.900-05
піднімання стріли автокрана КТА-25
після напівчистої обробки



Профілограми внутрішньої
циліндричної поверхні гільзи циліндра
гідроциліндра КС-4574.63.900-05
піднімання стріли автокрана КТА-25
після чистової обробки

№ круглогр.	1	2	3	4	5
Показник	Чорнова обробка				
Δ_1	8	6,92	7,9	6,34	6,04
Δ_2	6,68	4,82	7,78	1,98	6
Δ_3	1,66	2,32	5,08	0,38	6,02
Δ_4	1,04	4,56	1,56	1,98	0,18
Δ_5	4,34	5,64	2,48	2,08	1,42
Δ_6	3,72	8,12	3,62	3,38	7
Δ_7	6,78	7,42	4,54	6,52	10,62
Δ_8	4,88	3	7,8	4	13,58
Δ_9	2,38	1,58	3,8	1,82	9,86
Δ_{10}	2,08	0,3	1,86	1,22	7,94
Δ_{11}	1,86	4,86	1,7	0,54	5,3
Δ_{12}	2,26	9,36	2,02	5,92	4,8
Δ_{13}	6,88	10,64	7,46	10,38	3,2
Δ_{14}	8,4	10,38	7,2	11,8	1,74
Δ_{15}	6,14	8,44	9,82	11,62	3,64
Δ_{16}	7,46	14,1	5,18	10,14	0,8
Δ_{17}	12,04	17,06	8,18	14,1	2,46
Δ_{18}	20,62	26,36	18,14	21,16	11,94
Δ_{19}	34,94	37,6	32,44	33,48	26,38
Δ_{20}	35,02	42,64	32,6	37,64	31,06
Δ_{21}	42,48	43,38	41,34	40,52	37,62
Δ_{22}	43,32	47,68	39,54	45,04	40,14
Δ_{23}	35,3	45,02	31,84	39,4	29,82
Δ_{24}	24,88	34,332	26,38	28,22	17,88
Δ_{25}	24,72	24,64	9,52	21,22	19,48
Δ_{26}	14,1	20,74	0,3	12,94	8,72
Δ_{27}	5,88	5,88	2,46	6,42	4,26
Δ_{28}	1,98	1,18	2,18	1,82	1,04
Δ_{29}	1,84	1,64	7,7	4,2	2,22
Δ_{30}	7,84	4,56	7,7	7,74	3,52
Δ_{31}	10,62	8,26	9,5	10,54	7,6
Δ_{32}	14,44	11,24	13,64	9,7	8,84
Δ_{33}	9,92	6,76	7,8	8,14	11,16
Δ_{34}	7,94	3,78	4,54	2,62	8,9
Δ_{35}	2,9	0,52	0,14	4,3	6,84
Δ_{36}	5,94	6,86	2,7	7,34	5,76
$\bar{\Delta}_i$	11,98	13,682	10,513	12,129	10,383
$D(S)$	141,66	192,046	121,93	153	99,55
A_{n1}	12,365	15,125	10,365	13,716	7,766

A_{n2}	8,534	10,173	7,792	8,09	7,574
A_{n3}	6,439	5,639	6,503	5,687	8,339
A_{n4}	2,961	3,643	4,728	3,516	2,108
A_{n5}	0,518	0,169	2,359	1,799	1,415
A_{n6}	2,343	2,21	1,568	1,802	2,045
A_{n7}	0,583	0,986	1,122	0,181	0,29
A_{n8}	0,429	0,503	1,29	0,853	0,51
A_{n9}	0,812	0,096	0,164	0,204	0,625
A_{n10}	0,656	0,795	0,267	0,656	0,737
Напівчистова обробка					
$\Delta 1$	36.26	59,64	68,54	40,18	52,5
$\Delta 2$	35.38	53,64	67,06	30,82	50,06
$\Delta 3$	32.56	46,66	59,02	22,22	35,3
$\Delta 4$	19.16	36,64	47,52	21,48	16,38
$\Delta 5$	6.22	23,12	39,52	23,46	3,24
$\Delta 6$	2	11,36	27,94	15,22	3,46
$\Delta 7$	4.5	1,26	16,78	10,42	9,26
$\Delta 8$	5.66	1,9	7,98	4,98	8,2
$\Delta 9$	0	3,36	2,36	2,38	12,44
$\Delta 10$	5.78	3,5	1,5	4,14	18,64
$\Delta 11$	8,8	3,96	0	6,38	22,04
$\Delta 12$	9,5	3,36	2,06	2,62	22,06
$\Delta 13$	14,32	2,84	4,32	1,14	18,76
$\Delta 14$	11,42	2,85	6,16	2,12	24,68
$\Delta 15$	6,54	0,54	8,62	1,14	21,64
$\Delta 16$	2,96	0	7,38	2,14	20,02
$\Delta 17$	3,78	0	4,04	2,26	11,42
$\Delta 18$	6,08	1,46	4,24	8,34	8,44
$\Delta 19$	11,5	3,26	2,62	17,74	1,04
$\Delta 20$	7,9	3,46	0,4	18,4	3,76
$\Delta 21$	2,76	3,66	1,88	24,42	13,08
$\Delta 22$	4,56	2,58	2,88	39,3	21,62
$\Delta 23$	2,64	1,2	0,64	40,8	20,8
$\Delta 24$	3,26	0,7	0,96	36,5	23,98
$\Delta 25$	5,16	0,42	1,22	34,78	21,8
$\Delta 26$	9,74	0	1,4	35,08	19,72
$\Delta 27$	6,96	0	0,54	31,14	10,08
$\Delta 28$	3,48	02,72	3,34	13,24	8,3
$\Delta 29$	2,34	4,68	7,56	2,18	5,48
$\Delta 30$	4,22	5,68	11,88	4,84	1,2
$\Delta 31$	0,5	8,12	19,12	8,5	4,24
$\Delta 32$	5,54	15,85	23,26	10,6	7,88
$\Delta 33$	16,14	25,56	32,88	21,56	16

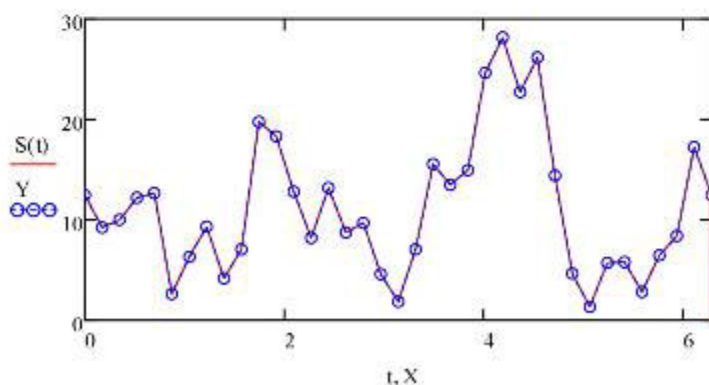
Δ_{34}	31,3	38,66	45,26	30,46	19,92
Δ_{35}	33,94	50,22	56,38	37,18	28,82
Δ_{36}	32,28	57,64	67,02	40,92	45,26
$\bar{\Delta}_i$	10,97	13,34	18,17	18,03	17,54
$D(S)$	114	343,184	491,28	185,138	149,8
A_{n1}	9,09	20,21	25,88	10,72	5,62
A_{n2}	8,53	14,31	16,34	12,27	6,69
A_{n3}	7,14	7,63	6,53	9,24	13,71
A_{n4}	3,17	3,63	0,75	2,54	2,42
A_{n5}	1,61	0,28	1,27	1,81	4,61
A_{n6}	1,23	0,63	0,62	0,69	1,31
A_{n7}	1,99	0,82	0,58	1,67	1,9
A_{n8}	1,2	0,31	0,05	1,57	0,97
A_{n9}	1,32	0,38	0,38	1,36	0,54
A_{n10}	0,43	0,14	0,068	1,36	1,15
Чистова обробка					
Δ_1	12,5	14,03	22,38	13,56	5,36
Δ_2	9,26	12,16	19,2	12,76	10,42
Δ_3	10,02	10,415	14,64	11,34	10,3
Δ_4	12,22	10,305	14,3	10,7	5,98
Δ_5	12,7	10,82	16,4	10,7	2,88
Δ_6	2,66	8,94	18,38	8,43	3,74
Δ_7	6,34	4,59	6,2	5,06	3,12
Δ_8	9,34	6,725	6,86	7,15	5,7
Δ_9	4,2	3,7	0,32	3,89	7,36
Δ_{10}	7,1	6,325	2,54	7,59	14,4
Δ_{11}	19,78	8,39	4,4	9,34	4,82
Δ_{12}	18,34	8,5	2,58	8,39	4,14
Δ_{13}	12,84	6,995	2,8	6,46	3,24
Δ_{14}	8,22	7,805	6,26	8,42	11,4
Δ_{15}	13,2	8,97	7,06	11,14	15,36
Δ_{16}	8,76	7,66	7,52	8,67	10,76
Δ_{17}	9,72	6,145	2,68	6,45	7,26
Δ_{18}	4,64	3,65	5,78	3,79	1,1
Δ_{19}	1,88	5,91	2,28	5,26	10,98
Δ_{20}	7,1	9,155	5,46	7,38	7,82
Δ_{21}	15,56	14,005	7,04	10,42	5,1
Δ_{22}	13,52	18,95	15,5	14,38	9,56
Δ_{23}	14,98	22,05	17,1	18,64	20,46
Δ_{24}	24,66	26,035	20,84	23,22	21,38
Δ_{25}	28,16	28,095	20,2	24,22	20,44
Δ_{26}	22,74	28,61	27,54	26,42	26,82
Δ_{27}	26,16	24,185	24,38	22,12	13,78

Δ_{28}	14,42	18,485	25,02	18,69	16,84
Δ_{29}	4,68	10,755	17,38	11,31	12,46
Δ_{30}	1,36	4,665	6,5	5,29	8,64
Δ_{31}	5,74	6,16	2,12	6,45	11,78
Δ_{32}	5,82	4,37	4,84	3,93	0,7
Δ_{33}	2,86	4,48	5,04	4,89	7,2
Δ_{34}	6,5	5,165	0,6	4,01	3,78
Δ_{35}	8,44	9,41	11,52	8,85	6,04
Δ_{36}	17,26	14,7	16	14,1	8,44
$\bar{\Delta}_i$	11,213	7,34	10,823	10,64	9,431
$D(S)$	39,613	13,115	56,43	34,35	29,444
A_{n1}	3,024	2,153	5,33	4,23	4,784
A_{n2}	3,817	1,211	6,017	4,42	3,132
A_{n3}	6,582	3,211	6,261	5,3	3,731
A_{n4}	0,95	0,989	1,243	1,1	1,334
A_{n5}	1,486	1,485	1,457	0,05	1,959
A_{n6}	0,209	0,755	0,508	0,17	0,959
A_{n7}	2,043	1,93	1,59	1,05	1,724
A_{n8}	0,98	0,548	1,54	0,41	1,083
A_{n9}	1,894	1,312	0,211	0,57	1,198
A_{n10}	0,57	0,574	0,502	0,24	0,317

Програма в середовищі MatCAD для апроксимації відхилень від круглості рядом Фурє та пошуку гармонік ряду

```
N0 := last(Y)      N0 = 36      i := 0..N0      Xi :=  $\frac{i \cdot 2 \cdot \pi}{N0}$ 
```

```
S(t) :=  $\begin{cases} 0 \\ \text{for } i \in 0..N0 - 1 \\ r \leftarrow Y_i + (t - X_i) \cdot \frac{Y_{i+1} - Y_i}{X_{i+1} - X_i} \text{ if } X_i \leq t < X_{i+1} \\ r \end{cases}$ 
```



— Апроксимація експ. даних
 ○○ Эксп. дані

Y :=

12.5
9.26
10.02
12.22
12.7
2.66
6.34
9.34
4.2
7.1
19.78
18.34
12.84
8.22
13.2
8.76
9.72
4.64
1.88
7.1
15.56
13.52
14.98
24.66
28.16
22.74
26.16
14.42
4.68
1.36
5.74
5.82
2.86
6.5
8.44
17.26
12.5

Кількість врахованих гармонік nmax := 10

$$a_0 := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} S(t) dt$$

n := 1..nmax

$$a_n := \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} S(t) \cdot \cos(n \cdot t) dt \quad b_n := \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} S(t) \cdot \sin(n \cdot t) dt$$

$$U(t) := \begin{cases} r \leftarrow 0 \\ \text{for } n \in 1..nmax \\ r \leftarrow r + a_n \cdot \cos(n \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot t) \\ r + a_0 \end{cases}$$

a _n =	b _n =
-2.269	-1.998
-1.896	3.313
6.582	0.038
-0.171	-0.934
-1.468	0.226
-0.026	-0.207
1.844	-0.878
-0.92	-0.338
-0.15	-1.888
-0.04	-0.568

$$D_n := \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2}$$

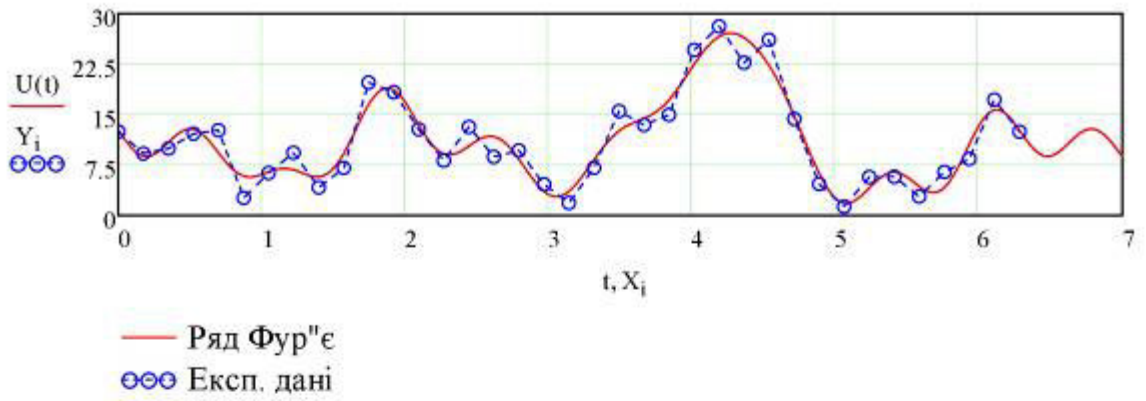
$$V_n := \frac{D_n}{\left(\sum_{n=1}^{nmax} D_n \right)} \cdot 100$$

$$DS := \frac{\sum_{n=1}^{nmax} (D_n)^2}{2}$$

$$\gamma(r, s) := \begin{cases} g \leftarrow \operatorname{atan}\left(\frac{s}{r}\right) \\ g \leftarrow g + \pi \text{ if } r < 0 \wedge s < 0 \\ g \leftarrow -g \text{ if } r > 0 \wedge s < 0 \\ g \leftarrow -g + \pi \text{ if } r < 0 \wedge s > 0 \\ g \cdot \frac{180}{\pi} \end{cases}$$

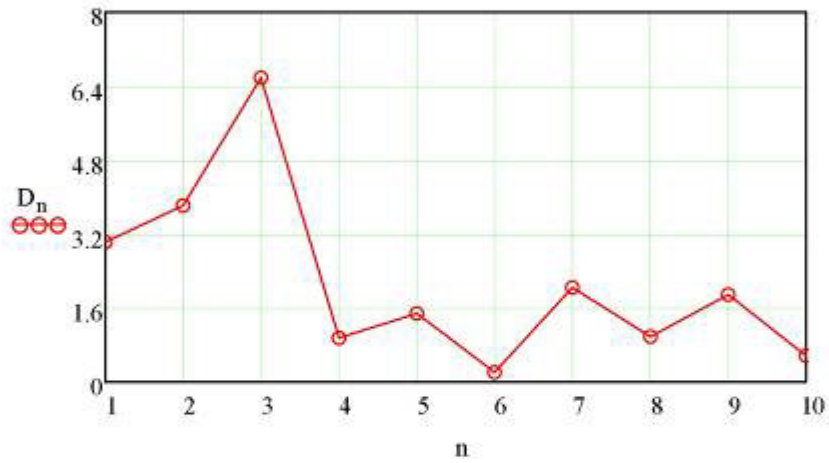
D _n =	V _n =
3.024	14.029
3.817	17.71
6.582	30.538
0.95	4.408
1.486	6.893
0.209	0.967
2.043	9.477
0.98	4.548
1.894	8.786
0.57	2.643

DS = 39.613

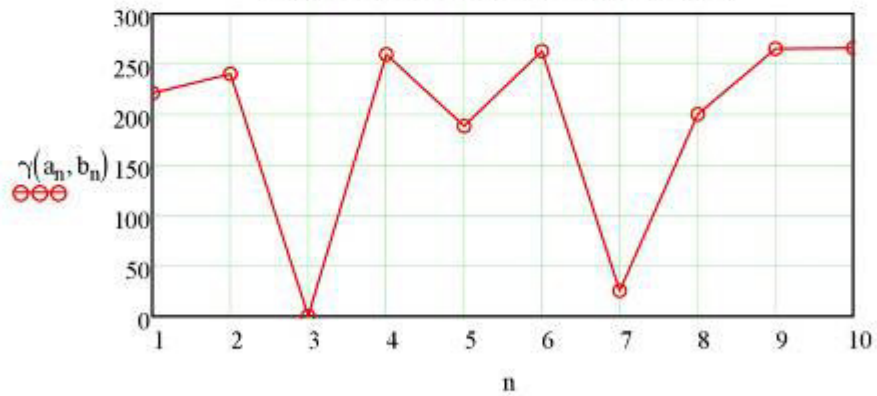


$a_0 = 11.213$

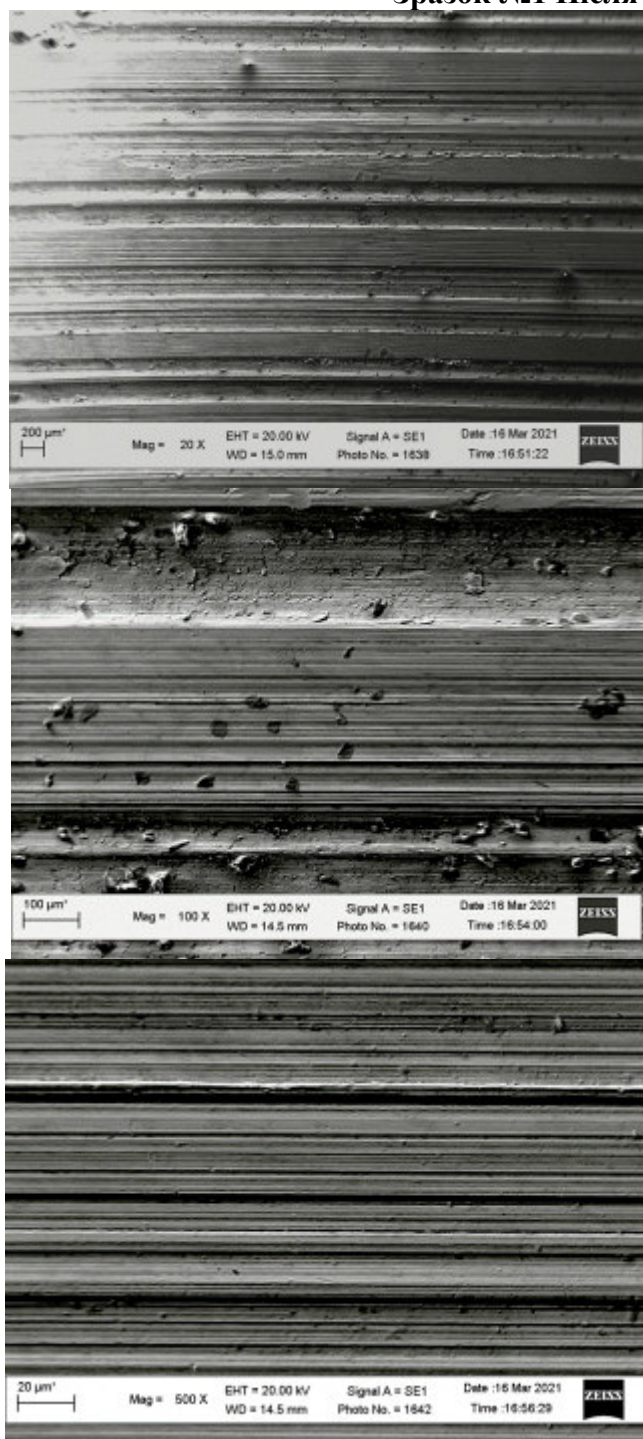
Амплітуди гармонік

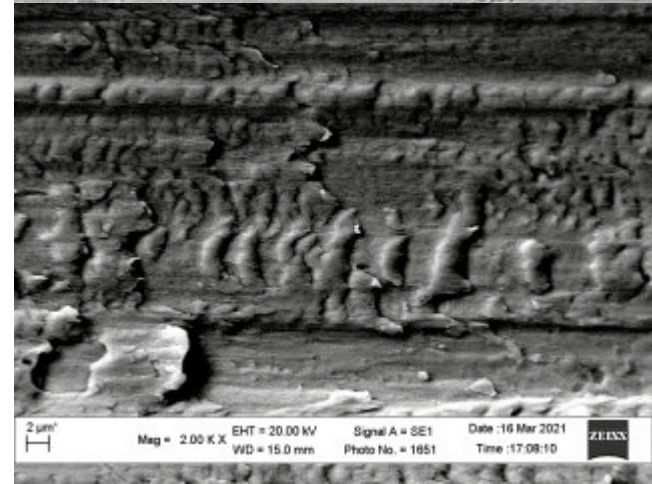
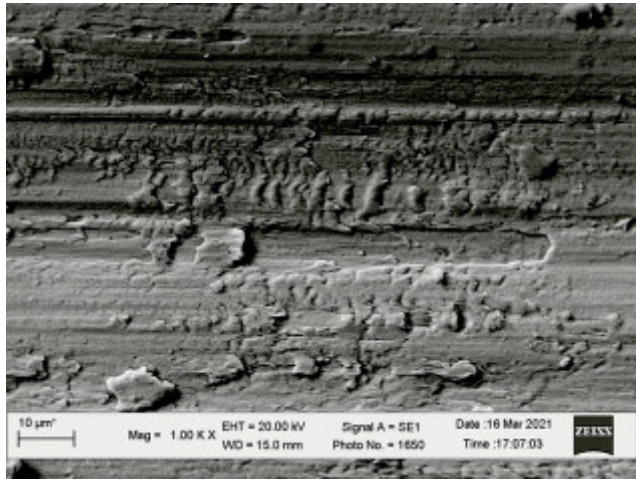
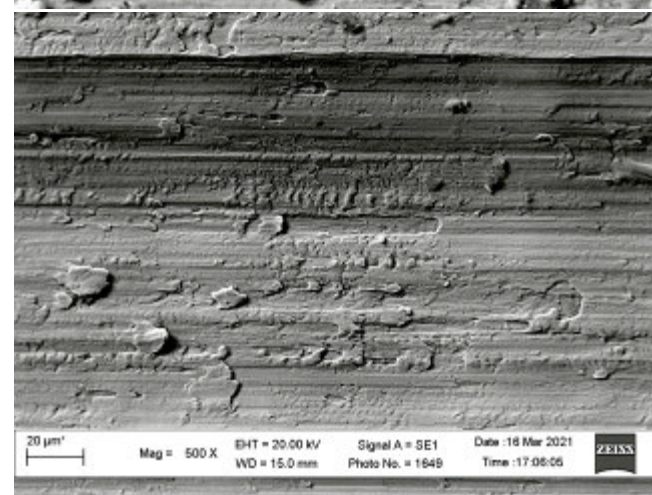
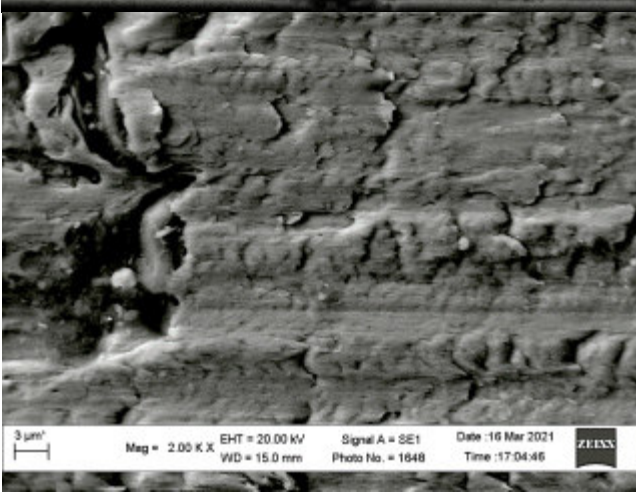
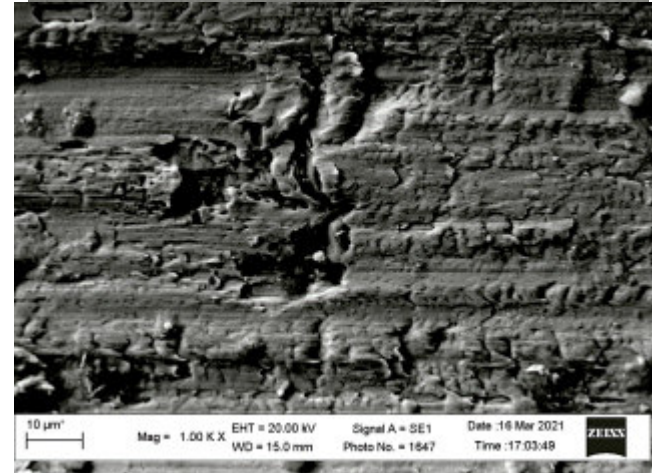
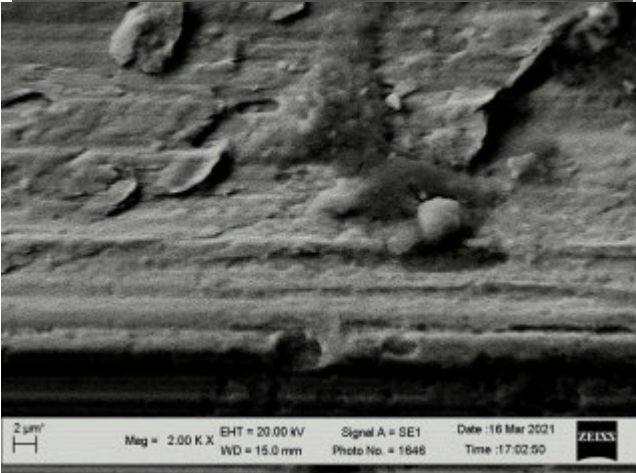
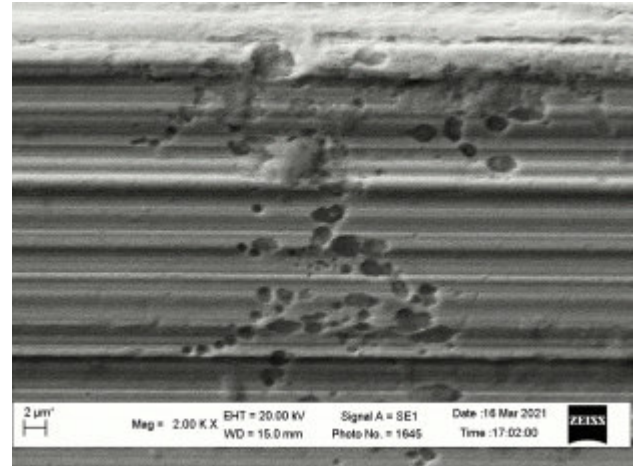
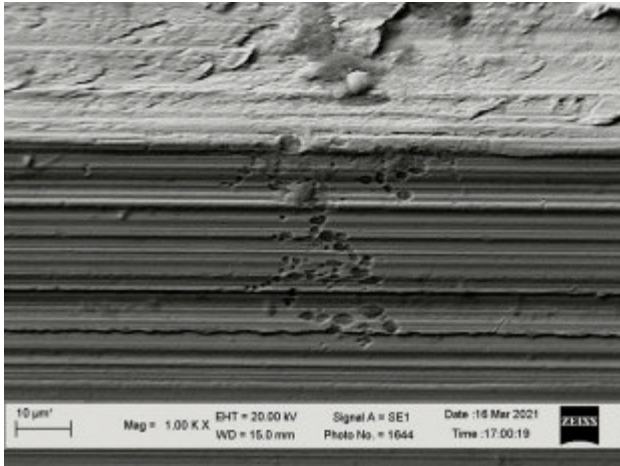


Зсуви фаз гармонік (градуси)

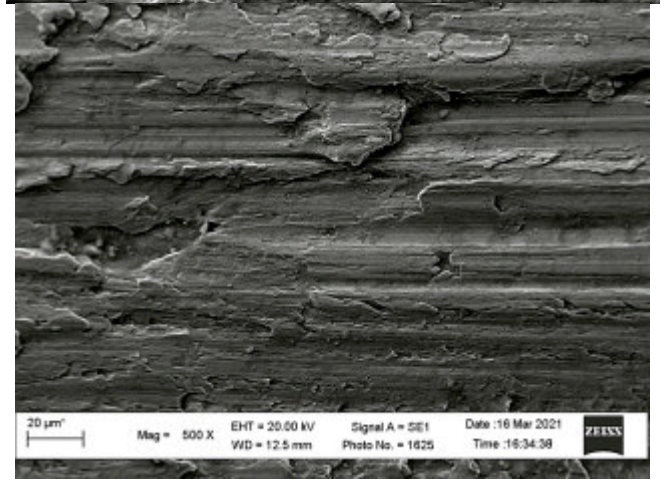
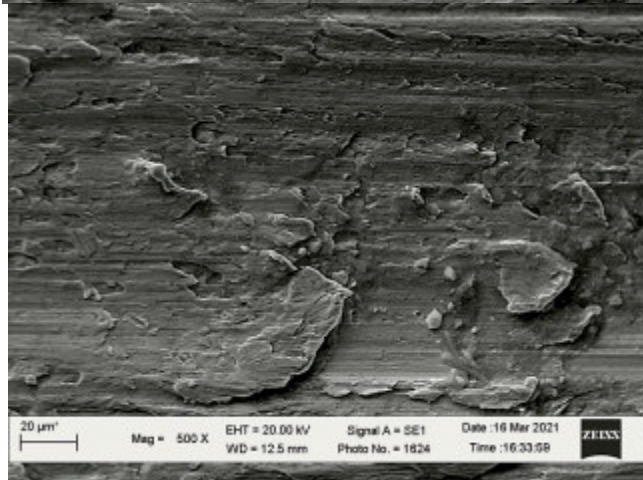
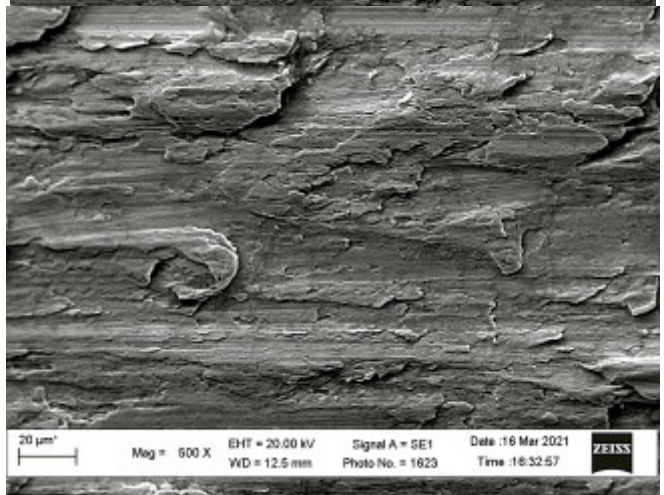
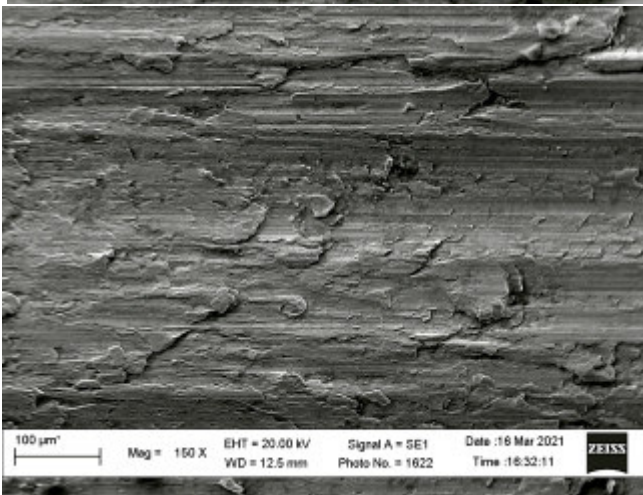
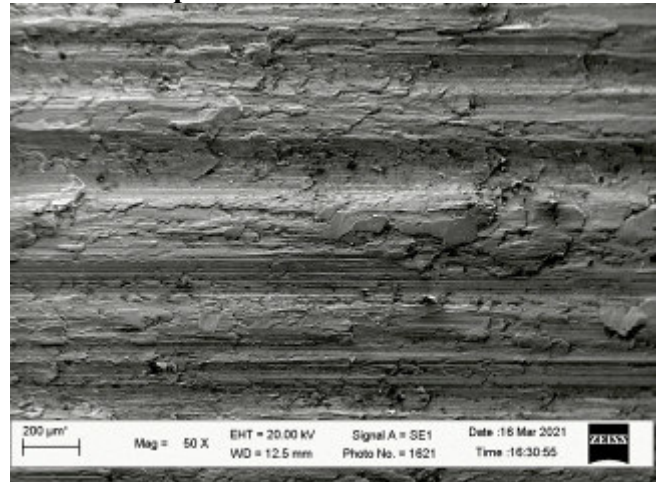
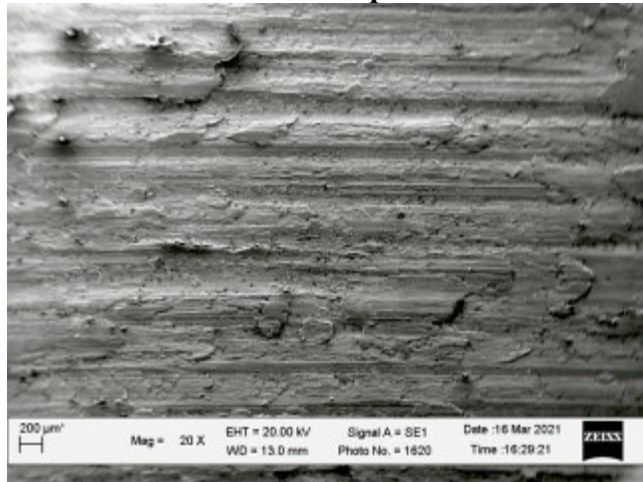


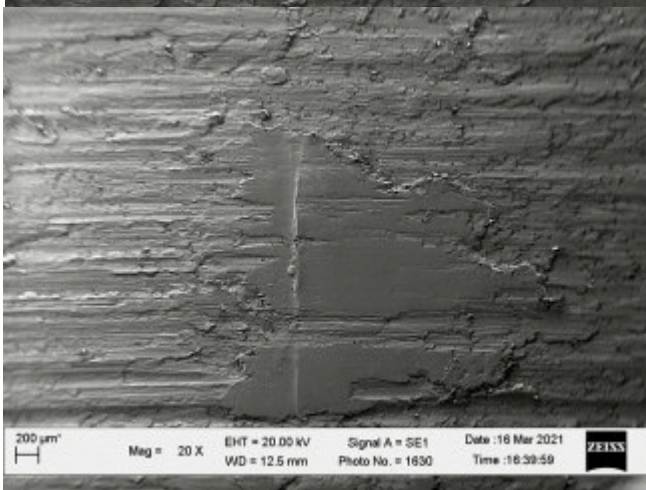
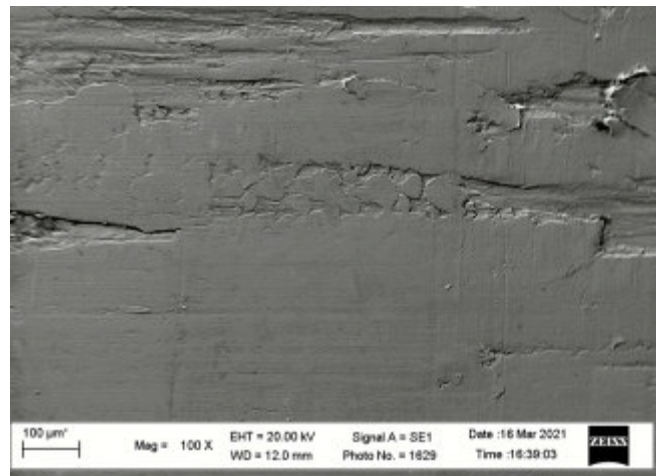
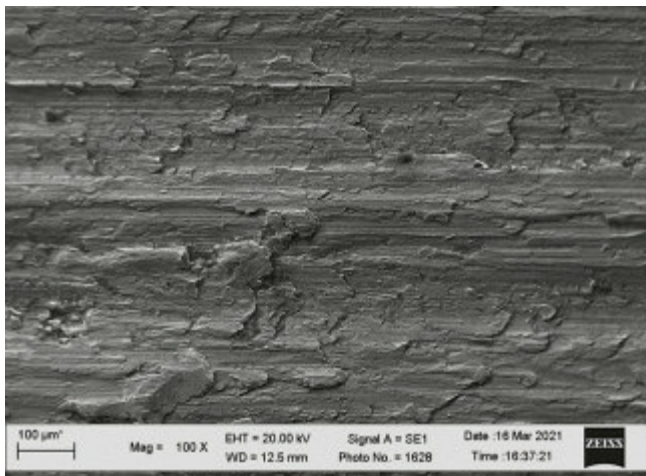
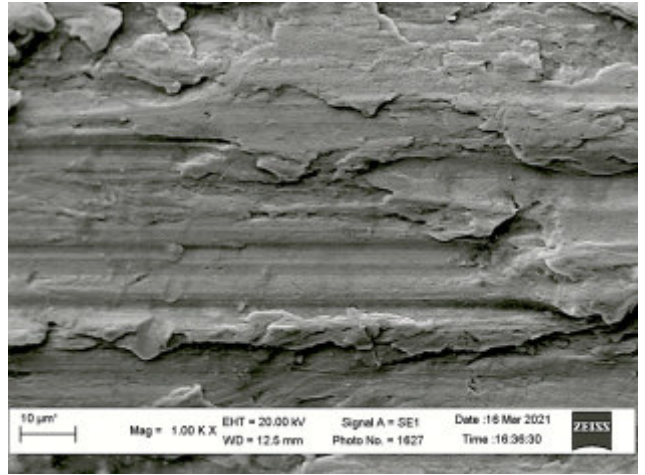
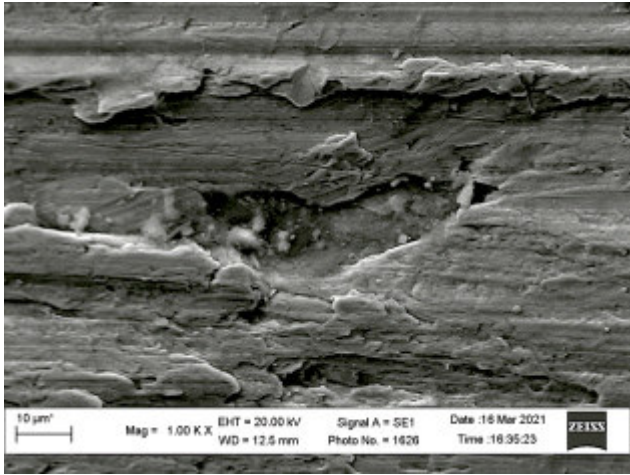
Зразок №1 Після чорної обробки



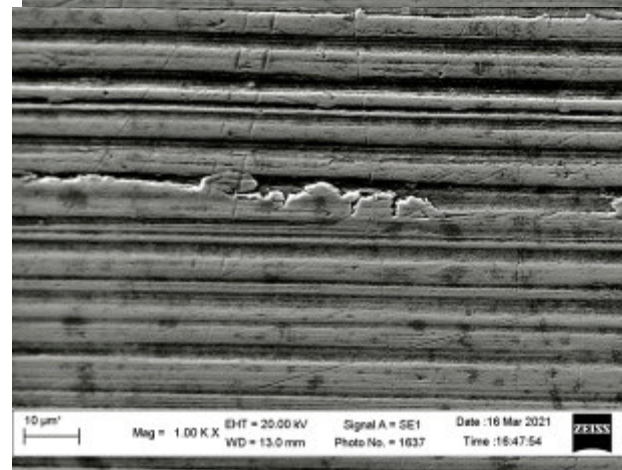
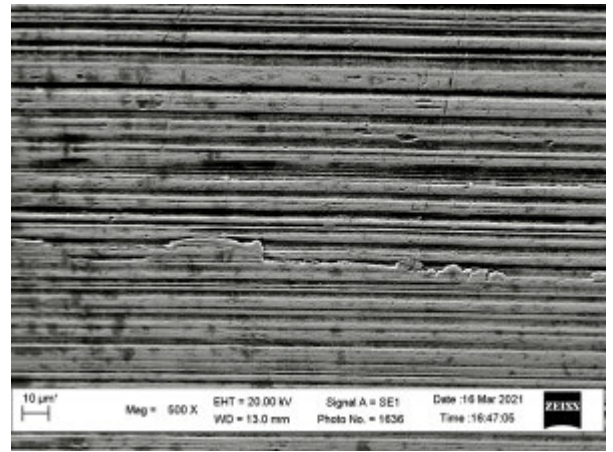
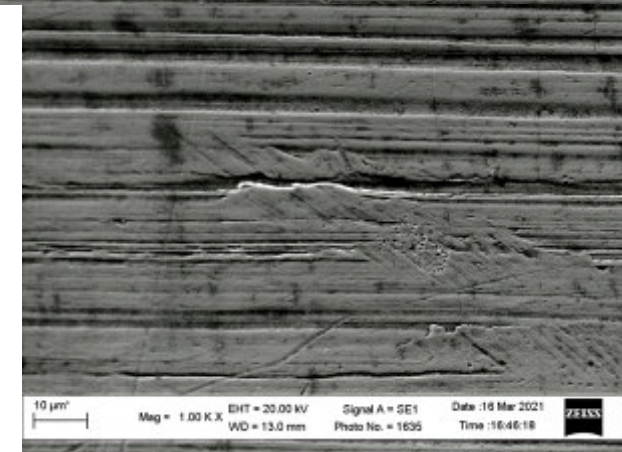
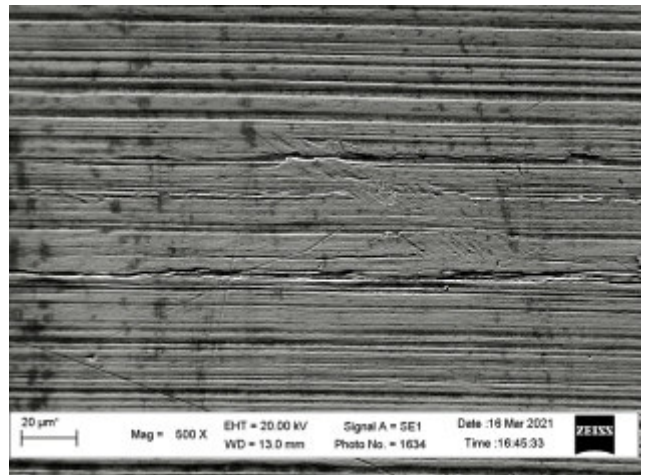
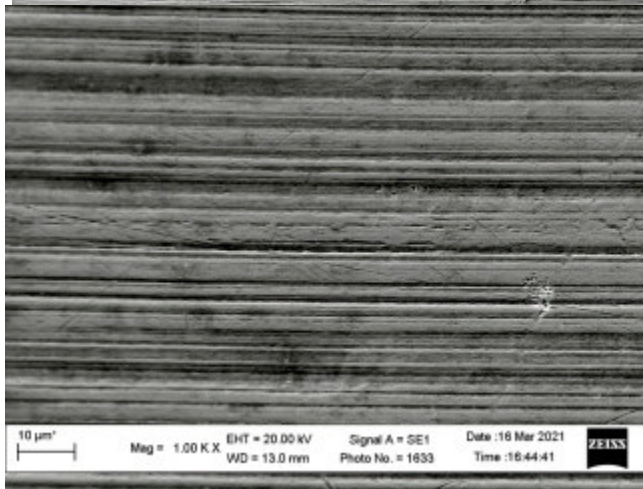
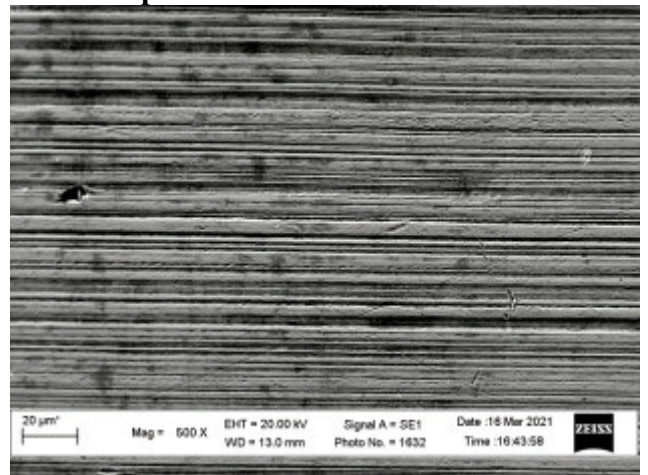
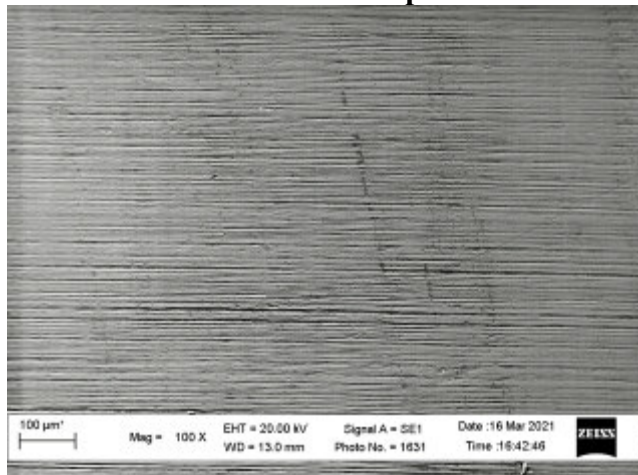


Зразок №2 Після напівчистової обробки





Зразок №3 Після фінішної обробки



Текст програми для визначення математичного сподівання та дисперсії використовуючи теорію малої вибірки

$n := \text{last}(t)$	$t := \begin{pmatrix} 1.02 \\ 1.01 \\ 0.99 \\ 0.99 \\ 1.03 \\ 1.02 \\ 1.02 \\ 1.02 \\ 1.01 \end{pmatrix}$	
$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} := \begin{cases} a \leftarrow t_1 \\ b \leftarrow t_1 \\ \text{for } k \in 1..n \\ \quad \left \begin{array}{l} a \leftarrow t_k \text{ if } t_k < a \\ b \leftarrow t_k \text{ if } t_k > b \end{array} \right. \\ \left(\begin{array}{l} a \\ b \end{array} \right) \end{cases}$		
$\sigma := \frac{b - a}{6}$		
$k := 1..n$		
$\text{prod1}_k := 1 \quad \text{prod2}_k := 1 \quad \text{sum}_k := 0$		
$k := 1..n$		
$z1_k := \frac{a - t_k}{\sigma} \quad z2_k := \frac{b - t_k}{\sigma}$		
$\begin{aligned} n &:= 10 \\ a &:= 0.99 \\ b &:= 1.03 \\ \sigma &:= 6.667 \times 10^{-3} \end{aligned}$		
$\Phi z1_k := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{z1_k} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad \Phi z2_k := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{z2_k} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$		
$c_k := \frac{1}{1 + \Phi z2_k - \Phi z1_k}$		
$e1_k := e^{-\frac{(z1_k)^2}{2}} \quad e2_k := e^{-\frac{(z2_k)^2}{2}} \quad \text{prod2}_k := \begin{cases} p \leftarrow 1 \\ \text{for } i \in k..n \\ \quad p \leftarrow p \cdot c_i \\ p \end{cases}$		

$$\begin{array}{l}
 \text{Sm} := \left| \begin{array}{l}
 s1 \leftarrow 0 \\
 \text{for } i \in 1..n \\
 \quad s1 \leftarrow s1 + \left[\text{prod2}_i \cdot \left[\frac{\sigma}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot (e1_i - e2_i) + t_i \cdot (\Phi z2_i - \Phi z1_i) \right] \right] \\
 s1
 \end{array} \right. \\
 \text{prod1}_k := \left| \begin{array}{l}
 p \leftarrow 1 \\
 \text{for } i \in 1..n \\
 \quad p \leftarrow p \cdot c_i \\
 p
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\text{Sd} := \left| \begin{array}{l}
 s1 \leftarrow 0 \\
 \text{for } i \in 1..n \\
 \quad s1 \leftarrow s1 + \left[\text{prod2}_i \cdot \left[\frac{\sigma}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot [(\sigma \cdot z1_i + 2 \cdot t_i) \cdot e1_i - (\sigma \cdot z2_i + 2 \cdot t_i) \cdot e2_i] + [\sigma^2 + (t_i)^2] \cdot (\Phi z2_i - \Phi z1_i) \right] \right] \\
 s1
 \end{array} \right.$$

$$\text{Mt} := \frac{a + b}{2} \cdot \text{prod1} + \text{Sm}$$

$$\text{Dt} := \frac{a^2 + a \cdot b + b^2}{3} \cdot \text{prod1} + \text{Sd} - \text{Mt}^2$$

$$\text{mt} := \left| \begin{array}{l}
 s1 \leftarrow 0 \\
 \text{for } i \in 1..n \\
 \quad s1 \leftarrow s1 + t_i \\
 \frac{s1}{n}
 \end{array} \right.$$

$$\text{D} := \left| \begin{array}{l}
 s1 \leftarrow 0 \\
 \text{for } i \in 1..n \\
 \quad s1 \leftarrow s1 + (t_i - \text{mt})^2 \\
 \frac{s1}{n}
 \end{array} \right.$$

Mt =

	1
1	1.008
2	1.008
3	1.008
4	1.008
5	1.008
6	1.008
7	1.008
8	1.008
9	1.008
10	1.008

Dt =

	1
1	1.287 · 10 ⁻⁴
2	1.287 · 10 ⁻⁴
3	1.287 · 10 ⁻⁴
4	1.287 · 10 ⁻⁴
5	1.287 · 10 ⁻⁴
6	1.287 · 10 ⁻⁴
7	1.287 · 10 ⁻⁴
8	1.287 · 10 ⁻⁴
9	1.287 · 10 ⁻⁴
10	1.287 · 10 ⁻⁴

Статистичні ряди і вибіркові значення характеристик розсіювання величини R_q при певних подачах.

Харак-ки розсіювання	Значення s_q подач, мм/об									
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
	0,050	0,060	0,075	0,088	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,250
Вибіркові значення характеристик розсіювання R_a .										
Чавун СЧ 21										
№ полож.										
1	4,05	4,12	3,57	3,93	3,17	3,81	3,72	5,41	4,77	6,01
2	4,21	3,99	3,68	3,57	3,11	3,49	3,62	5,23	5,45	5,87
3	4,25	4,16	3,58	3,4	3,24	3,54	3,5	5,53	5,76	6,05
4	4,22	4,01	3,76	3,65	3,65	3,35	3,75	5,21	5,57	5,82
5	4,27	4,3	3,55	3,67	3,11	3,97	3,2	5,49	6,76	6,16
6	4,07	4,02	3,53	3,58	3,55	3,62	3,46	5,14	5,78	6,09
7	4,31	4,25	3,59	3,41	3,56	3,23	3,65	5,25	6,34	6,12
8	4,25	4,31	3,71	3,51	3,45	3,15	3,73	5,13	5,87	6,03
9	4,08	4,14	3,58	3,62	3,19	3,81	3,57	5,67	6,13	5,94
10	4,3	4,09	3,47	3,78	3,49	3,98	3,36	5,37	5,51	5,89
$M(R_{as}), \text{мкм}$	4,21	4,13	3,57	3,676	3,415	3,678	3,47	5,37	5,778	5,94
$D(R_{as}), \text{мкм}$	0,0047	0,006 2	0,005 6	0,017	0,02	0,065	0,021	0,021	0,182	0,005 6
W	0,855	0,922	0,933	0,953	0,879	0,945	0,921	0,932	0,975	0,965
Kv	0,0163	0,019 1	0,021	0,035 5	0,041 4	0,069 3	0,041 8	0,027	0,073 8	0,012 6
Дюралюмин Д16										
№ полож.										
1	1,88	3,22	2,44	2,82	2,73	2,83	3,79	4,73	6,21	6,75
2	1,6	3,17	1,97	2,87	2,68	3,08	3,58	4,59	5,76	6,65
3	1,62	2,75	2,47	2,85	3,02	2,65	3,38	4,91	5,84	7,14
4	1,72	2,61	2,32	2,54	2,75	2,86	3,89	5,26	5,9	7,42
5	1,96	2,93	2,39	2,78	2,87	3,0	3,85	5,44	6,29	7,68
6	2,03	2,02	2,11	2,51	2,62	2,96	3,68	5,5	5,65	7,55
7	2,15	2,95	2,36	2,87	3,01	3,12	3,94	4,85	5,63	7,12
8	1,75	3,01	2,32	2,79	2,85	2,91	3,64	4,82	5,95	7,52
9	1,86	2,87	2,14	2,69	2,94	2,84	3,93	4,93	6,19	7,16
10	2,11	2,97	2,16	2,63	2,79	2,79	3,59	5,12	6,05	7,14
$M(R_{as}), \text{мкм}$	1,94	2,94	2,19	2,67	2,83	2,84	3,67	5,27	6,03	7,19
$D(R_{as}), \text{мкм}$	0,021	0,013	0,011	0,007 3	0,008	0,01	0,02	0,155	0,022	0,043
W	0,941	0,842	0,931	0,876	0,958	0,982	0,936	0,942	0,944	0,939
Kv	0,0747	0,038 8	0,047 9	0,032	0,031 6	0,035 2	0,038 5	0,074 7	0,024 6	0,028 8

Латунь ЛС63-3										
№ полож.										
1	2,99	2,3	2,38	2,87	3,67	3,97	5,64	6,34	8,83	
2	1,85	2,49	2,38	2,75	3,4	4,47	4,79	5,89	8,23	
3	2	2,14	2,15	3,16	3,54	5,02	4,89	6,26	7,02	
4	2,89	2,16	2,18	2,81	3,47	4,44	5,13	6,24	6,94	
5	1,9	2,16	2,7	3,1	3,51	4,33	5,23	5,39	7,09	
6	2,16	2,51	2,69	2,81	3,47	4,5	4,62	6,04	7,78	
7	2,06	2,53	2,14	3,15	3,43	4,97	4,91	6,34	7,64	
8	1,15	2,19	2,26	2,84	3,75	4,13	5,17	6,13	7,56	
9	1,94	2,34	2,54	2,98	3,61	4,32	5,62	6,41	7,49	
10	2,65	2,41	2,63	3,01	3,51	4,67	5,07	5,97	8,16	
$M(R_{as}), \text{МКМ}$	2,214	2,36	2,57	2,98	3,55	4,54	5,146	5,89	7,853	
$D(R_{as}), \text{МКМ}$	0,219	0,009 1	0,024	0,008 6	0,007 2	0,079	0,058	0,096	0,181	
W	0,924	0,887	0,895	0,904	0,930	0,952	0,939	0,862	0,943	
Kv	0,2114	0,040 4	0,060 3	0,031 1	0,023 9	0,061 9	0,046 8	0,052 6	0,054 2	
Силумін АЛ4										
1	0,86	1,82	2,32	2,92	2,25	2,77	2,86	3,06	5,83	5,17
2	1,13	0,86	1,66	1,96	2,3	2,7	2,97	4,59	3,94	4,52
3	1,63	0,87	1,53	2,13	2,22	2,83	2,72	2,82	5,95	3,75
4	0,55	1,33	1,4	2,85	2,8	2,7	2,65	3,0	4,21	4,67
5	1,24	1,3	2,27	2,46	2,76	2,5	2,5	3,68	4,17	3,61
6	1,85	0,92	2,06	1,45	2,46	2,62	2,66	2,93	5,65	6,04
7	0,67	0,8	3,06	2,96	2,4	2,85	2,85	3,27	4,52	5,82
8	1,17	1,31	3,5	1,93	2,24	3,14	2,86	4,38	4,27	4,07
9	0,84	0,76	2,4	2,31	2,66	2,96	2,43	4,04	4,63	6,02
10	1,63	1,51	1,65	1,45	2,34	2,68	2,8	3,57	5,12	5,37
$M(R_{as}), \text{МКМ}$	1,27	1,28	2,23	2,03	2,44	2,79	2,74	3,73	4,86	5,18
$D(R_{as}), \text{МКМ}$	0,138	0,085	0,33	0,168	0,025	0,028	0,021	0,17	0,2	0,41
W	0,946	0,890	0,915	0,918	0,863	0,964	0,942	0,912	0,883	0,921
Kv	0,2925	0,227 8	0,257 6	0,201 9	0,064 8	0,06	0,052 9	0,110 5	0,092 6	0,123
Сталь 45										
1	1,7	0,88	1,1	0,95	1,7	1,93	1,57	2,17	2,56	4,46
2	1,25	0,8	1,12	0,64	1,15	1,6	1,19	2,01	2,15	3,5
3	1,11	0,86	0,9	0,56	0,83	1,28	1,43	2,31	2,55	4,25
4	1,3	0,84	0,96	0,75	0,84	1,59	1,21	1,44	2,73	3,88
5	1,57	1,12	0,7	1,03	1,12	1,21	1,36	1,7	2,65	2,79
6	1,55	0,95	0,6	1,27	1,0	1,05	1,02	1,79	2,95	4,21
7	0,9	1,0	1,15	1,18	0,85	1,75	1,72	2,24	2,08	3,81
8	0,98	0,95	0,92	0,65	0,96	1,89	1,79	2,36	2,91	3,38
9	1,42	1,06	0,56	0,88	1,14	1,74	1,48	2,18	2,55	3,99
10	1,48	0,98	0,56	0,98	1,21	1,71	1,19	3,01	2,5	3,96
$M(R_{as}), \text{МКМ}$	1,38	0,99	0,751	0,93	1,08	1,67	1,36	2,39	2,54	3,85
$D(R_{as}), \text{МКМ}$	0,039	0,01	0,029	0,025	0,011	0,032	0,044	0,15	0,037	0,11
W	0,957	0,970	0,882	0,956	0,838	0,910	0,959	0,950	0,891	0,938

K_v	0,1431	0,101	0,226 8	0,17	0,097 1	0,107 1	0,154 2	0,162	0,075 7	0,086 1
30XГСА										
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,088	0,1	0,125	0,15
1	2,35	1,37	1,33	1,52	1,57	1,37	2,97	2,41	3,81	4,95
2	2,48	1,36	1,46	1,67	1,72	1,63	2,46	2,39	3,8	4,73
3	2,35	1,59	1,31	1,45	1,35	1,24	2,21	2,38	3,87	4,41
4	2,43	1,6	1,36	1,53	1,57	1,81	2,43	2,45	3,72	4,52
5	2,39	1,66	1,5	1,63	1,74	1,41	2,3	2,41	3,93	4,5
6	2,37	1,62	1,44	1,47	1,38	1,35	2,4	2,45	3,88	4,64
7	2,37	1,63	1,47	1,64	1,58	2,12	2,45	2,51	3,78	4,61
8	2,41	1,69	1,43	1,42	1,72	1,35	2,59	2,39	3,81	4,29
9	2,51	1,44	1,38	1,59	1,49	1,74	2,44	2,47	3,79	4,64
10	2,47	1,51	1,53	1,62	1,64	1,69	2,63	2,5	3,91	4,75
$M(R_{as}), \text{MKM}$	2,44	1,52	1,44	1,58	1,59	1,66	2,54	2,46	3,84	4,66
$D(R_{as}), \text{MKM}$	0,0018	0,006 6	0,003 5	0,003 9	0,008	0,05	0,038	0,001 2	0,003 2	0,022
W	0,913	0,891	0,961	0,930	0,915	0,915	0,888	0,910	0,951	0,985
K_v	0,0174	0,053 4	0,041 1	0,039 5	0,056 3	0,134 7	0,076 7	0,014 1	0,014 7	0,031 8

Технічна характеристика верстату ТМ-1



Технічна характеристика верстату ТМ-1

ХОДЫ		S.A.E	METRIC
Ось X		30.0 in	762 mm
Ось Y		12.0 in	305 mm
Ось Z		16.0 in	406 mm
Расстояние от переднего торца шпинделя до стола (~ макс.)		20.0 in	508 mm
Расстояние от переднего торца шпинделя до стола (~ мин.)		4.0 in	102 mm
SPINDLE		S.A.E	METRIC
Максимальная мощность		7.5 hp	5.6 kW
Максимальная скорость		4000 rpm	4000 rpm
Максимальный крутящий момент		33.0 ft-lbf @ 1200 rpm	45.0 Nm @ 1200 rpm
Система привода		Direct Speed, Belt Drive	Direct Speed, Belt Drive
Конус		CT or BT 40	CT or BT 40
Смазывание подшипников		Grease Packed	Grease Packed
Охлаждение		Air Cooled	Air Cooled
СТОЛ		S.A.E	METRIC
Длина		47.8 in	1213 mm
Ширина		10.5 in	267 mm
Ширина Т-образных пазов		0.630 in	16 mm
Расстояние по центру Т-образных пазов		4.00 in	102 mm
Количество стандартных Т-образных пазов		3	3

Максимальный вес на столе (равномерно распределенный)	1000 lb	454 kg
FEEDRATES	S.A.E	METRIC
Резание на максимальную глубину	200 ipm	5.1 m/min
Ускоренные перемещения по оси X	200 ipm	5.1 m/min
Ускоренные перемещения по оси Y	200 ipm	5.1 m/min
Быстрые перемещения по оси Z	200 ipm	5.1 m/min
AXIS MOTORS	S.A.E	METRIC
Максимальное осевое усилие вдоль оси X	2000 lbf	8896 N
Максимальное осевое усилие по оси Y	2000 lbf	8896 N
Максимальное осевое усилие вдоль оси Z	2000 lbf	8896 N
AIR REQUIREMENTS	S.A.E	METRIC
Требуемое количество сжатого воздуха	4 scfm @ 100 psi	113 L/min @ 6.9 bar
Встроенный воздушный шланг	3/8 in	3/8 in
Муфта (пневматическая)	3/8 in	3/8 in
Минимальное давление воздуха	80 psi	5.5 bar
DIMENSIONS - SHIPPING	S.A.E	METRIC
Спутник для внутренних перевозок	100 in x 78 in x 100 in	254 cm x 199 cm x 254 cm
Экспортный спутник	100 in x 78 in x 100 in	254 cm x 199 cm x 254 cm
Масса	4500 lb	2042.0 kg

ELECTRICAL SPECIFICATION	S.A.E	METRIC
Скорость вращения шпинделя	4000 rpm	4000 rpm
Система привода	Direct Speed, Belt Drive	Direct Speed, Belt Drive
Мощность, передаваемая шпинделем	7.5 hp	5.6 kW
Напряжение переменного тока на входе (однофазный)	220 VAC	220 VAC
Полная нагрузка, амперы (однофазный)	40 A	40 A
Напряжение переменного тока на входе (трехфазный): низкое	220 VAC	220 VAC
Полная нагрузка, амперы (трехфазный): минимальная	25 A	25 A
Input AC Voltage (3 Phase) - High*	440 VAC	440 VAC
Full Load Amps (3 Phase) - High*	13 A	13 A

Текст програми в середовищі MathCAD для визначення координат траєкторії руху інструменту для формування ЧРМ на дослідному зразку

$$r_2 := 61.75 \quad S_0 := 2 \quad A := 1.0 \quad n := 180 \quad t := 0.5 \quad h := \frac{1}{t}$$

$$r_3 := r_2 + S_0 \quad r_4 := r_3 + S_0 \quad \text{к - ть елементів} \quad \text{крок розрахунку}$$

$$i := 0..360 \cdot h$$

$$b_i := 1 \cdot i \cdot t \quad \phi_i := b_i \quad \gamma := \left(\frac{360 \cdot 1}{n} \right)$$

крок розрахунку
координат

$$y2_i := r_2 \cdot \sin(\phi_i \text{ deg}) \quad y3_i := r_3 \cdot \sin(\phi_i \text{ deg}) \quad +$$

$$x2_i := r_2 \cdot \cos(\phi_i \text{ deg}) \quad x3_i := r_3 \cdot \cos(\phi_i \text{ deg})$$

$$y21_i := \sin(\phi_i \text{ deg}) \cdot \left[0.2 \cdot \pi \cdot A \cdot \text{asin} \left[\sin \left[n \cdot (\phi_i \text{ deg}) \right] \right] \right] + y2_i$$

$$x21_i := \cos(\phi_i \text{ deg}) \cdot \left[0.2 \cdot \pi \cdot A \cdot \text{asin} \left[\sin \left[n \cdot (\phi_i \text{ deg}) \right] \right] \right] + x2_i$$

$$y31_i := \sin(\phi_i \text{ deg}) \cdot \left[0.2 \cdot \pi \cdot A \cdot \text{asin} \left[\sin \left[n \cdot (\phi_i \text{ deg} + \gamma \text{ deg}) \right] \right] \right] + y3_i$$

$$x31_i := \cos(\phi_i \text{ deg}) \cdot \left[0.2 \cdot \pi \cdot A \cdot \text{asin} \left[\sin \left[n \cdot (\phi_i \text{ deg} + \gamma \text{ deg}) \right] \right] \right] + x3_i$$



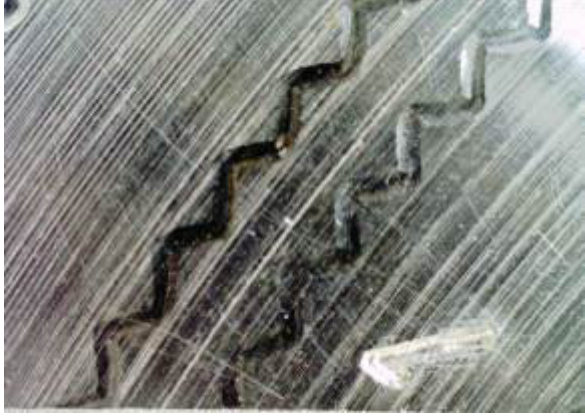

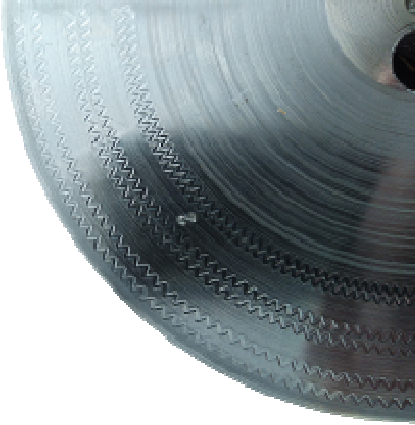



	0
0	61.7500000000
1	62.7345716089
2	61.7405951759
3	60.7422175838
4	61.7123835684
5	62.6772487551
6	61.6653737711
7	60.6497042426
8	61.5995801035
9	62.5435633285
10	61.5150226072
11	60.4832985792
12	61.4117270390
13	62.3336782040
14	61.2897248639
15	...

x21 =

	0
0	0.0000000000
1	0.5474763123
2	1.0776860975
3	1.5905909456
4	2.1550439214
5	2.7365477796
6	3.2317452980
7	3.7094948228
8	4.3074622537
9	4.9222851848
10	5.3818671147
11	5.8238792520
12	6.4546326068
13	7.1020255439
14	7.5254319553
15	...

y21 =

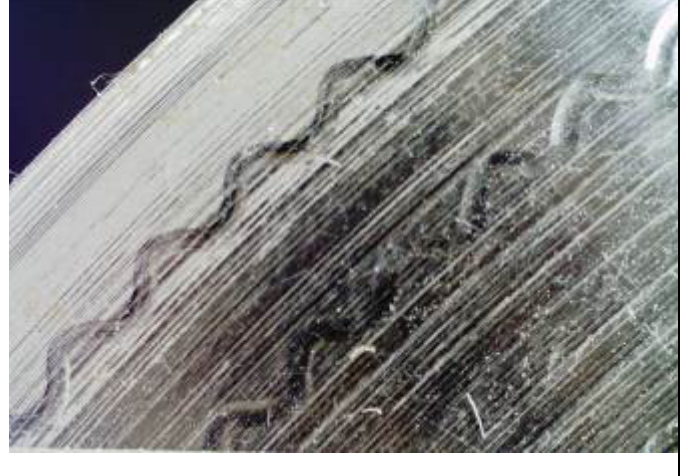
Фотографії зон дослідного зразка з ЧРМ, сформованим при різних режимах

№ зони	Фото мікрорельєфу	
1		
		
2		
		

3



4



5



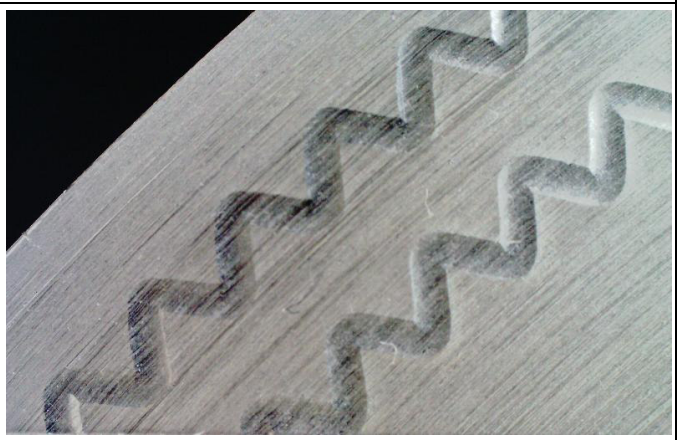
6



7



8



9





УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 114667

ДВОРІЗЦЕВА АДАПТИВНА РОЗТОЧУВАЛЬНА ГОЛОВКА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
10.07.2017.

Директор департаменту інтелектуальної
власності Міністерства економічного
розвитку і торгівлі України

 В.О. Жалдак



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 112248

**СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОДАЧІ НА ШОРСТКІСТЬ
ПОВЕРХНІ, ОТРИМАНОЇ В ПРОЦЕСІ РІЗАННЯ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
10.08.2016.

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України

А.А.Малиш



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

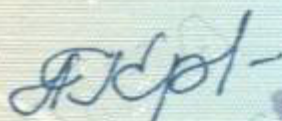
№ 108691

**ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЧИСТОВОГО ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ
ЗОВНІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
25.05.2015.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

 А.Г. Жарінова



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 118890

**ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЧИСТОВОГО ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ
ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ВІБРАЦІЙНИМ
ОБКочУВАННЯМ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
25.03.2019.

Заступник Міністра економічного
розвитку і торгівлі України

Ю. П. Бровченко



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 96138

Комп'ютерна програма "Визначення параметрів мікронерівностей поверхні металів" ("Analiz relefu")

(вид, назва твору)

Автор(и) Литвиненко Ярослав Володимирович, Марущак Павло Орестович, Дзюра Володимир Олексійович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

18.02.2020



Заступник Міністра розвитку економіки,
торгівлі та сільського господарства
України Д. О. Романович

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 100743

Комп'ютерна програма «Моделювання реалізації мікрорельєфу»

(вид, назва твору)

Автор(и) Литвиненко Ярослав Володимирович, Марущак Павло Орестович,
Дзюра Володимир Олексійович

(повне ім'я, прізвищем (як наявності))

Дата реєстрації 20 листопада 2020 р.

Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»

Андрій КУДІН



М.П.



Товариство з обмеженою відповідальністю
«ОСП Корпорація VATRA»

46005, Україна, м. Тернопіль, вул. Микулинецька 46
 тел.: +38 (0-352) 52-31-37, факс: +38 (0-352) 52-49-88, е-пошта: vatra@ukrpost.ua, http://vatra.ua

ООО «ОСП Корпорація VATRA» • 46005, Украина, г. Тернополь, ул. Микулинецкая 46
 LLC OSP VATRA Corporation • 46, Mykulynetska Str., Ternopil, 46005, Ukraine

№ _____
 На № _____ від _____

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт підтверджує те, що співробітниками Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя запропонований метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні сформованої точінням, а також метод визначення впливу кривизни поперечного перерізу циліндричних поверхонь на шорсткість, отриману в процесі точіння або розточування.

Проведення вказаних методів при механічній обробці виробів забезпечено зменшення основного часу обробки циліндричних поверхонь на 20%, а також дозволило призначити оптимальні режими обробки.

Заступник генерального директора
 з науково-технічного розвитку



(Handwritten signature)
 Вовк Я.Ю.

№ 23/06-20 від 25.06.2020

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт підтверджує те, що співробітниками Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя запропонована дворізева адаптивна розточувальна головка (Патент на винахід № 114667, Україна МПК В23В 29/03 (2006.01), С2 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201510127. Заявл. 16.10.2015, Опубл. 10.07.2017, бюл. № 13. – 10с.) введена у виробництво на ТОВ «Виробничо комерційна фірма Дрогобицький завод автомобільних кранів» (ТОВ «ВКФ ДЗАК»).

Директор
ТОВ «ВКФ



Якимів М.В.

№ 23-1/06-00 вч 25.06.2009

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт підтверджує те, що рекомендації розроблені при виконанні НДР «Підвищення ефективності формування якісних показників робочих поверхонь деталей машин» № держ. реєстрації 0115U002454 (керівник Дзюра В.О.) впроваджені при виготовленні гільз гідроциліндрів автомобільних кранів на ТОВ «Виробничо комерційна фірма Дрогобицький завод автомобільних кранів» (ТОВ «ВКФ ДЗАК»).

Директор технічної
ТОВ «ВКФ ДЗАК»



Якимів М.В.
Якимів М.В.

ТОВ «ВКФ ДЗАК»

82100, Львівська обл., м. Дрогобич, вул. Гайдамацька, 22

тел.: +38 0324 417337; +38 0324 417339

WWW.DAK.COM.UA

ООО «ПКФ ДЗАК»

82100, Львовская обл., г. Дрогобыч, ул. Гайдамацкая, 22

e-mail: dak@dak.com.ua; nav@dak.com.ua

ПОГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
технічного університету
імені Івана Пулюя
Марущак П.О.
«08» 02 2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор
Тернопільського національного
технічного університету
імені Івана Пулюя
Мягчик М.М.
«08» 02 2021 р.

АКТ

Ми, які нижче підписалися, представники Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя: начальник навчального відділу Ткаченко І.Г., завідувач кафедрою інжинірингу машинобудівних технологій Окіпний І.Б., доцент кафедри МТ Дячун А.Є. склали цей акт про те, що у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» використовуються отримані наукові результати виконання ініціативної НДР ВК 50-15 № держреєстрації № 0115U002454 «Підвищення ефективності формування якісних показників робочих поверхонь деталей машин».

Результати роботи використовуються у лекційних курсах, практичних заняттях та відображені у навчальних програмах дисциплін: «Теоретичні основи технології виробництва деталей та складання машин», «Технології машинобудівних виробництв».

Використання результатів наукової роботи в навчальному процесі сприяє більш широкому розумінню студентами перспективних напрямків розвитку сучасної науки і техніки.


Голова комісії:

Нач. навч. відділу

Члени комісії:

Зав. каф. МТ

Доцент кафедри МТ

 І.Г. Ткаченко



І.Б. Окіпний

А.Є. Дячун

МІНЕКОНОМІКИ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "ЛЬВІВСЬКИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ
 ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ"
 (ДП "Львівстандартметрологія")

вул. Князя Романа, 38, м. Львів, 79005, тел.: (032) 261-60-30, факс: (032) 261-66-79
 web: http://www.semesta.lviv.ua, e-mail: centr@semesta.lviv.ua, код згідно з ЄДРПОУ 04725912

(Галузь вимірювальних можливостей затверджена наказом № 679 від 28.12.2019 р.)

СВІДОЦТВО
про контроль метрологічних
характеристик засобу вимірювальної техніки

№ 33/2723

Чинне до "19" жовтня 2021 р.

Назва Динамометр переносний

Умовне позначення ДОСМ-3-0,1 Зав. № С 357

Виробник -----

За результатами контролю метрологічних характеристик встановлено, що засіб вимірювальної техніки відповідає вимогам Експлуатаційна документація

(позначення та назва нормативного документа,

діапазон (0...100) кгс

що містить вимоги до метрологічних характеристик і значення метрологічних характеристик

категорія В

(клас точності, похибки, діапазон вимірювань)

Додаток: на 1 стор. у 1 прим.

Персонал, що виконував
роботи


(підпис)

Р.С.Грось
(ініціали, прізвище)

"19" жовтня 2020 р.



Начальник відділу повірки
та калібрування ЗВТ геометричних
та механічних величин


(підпис)

І.В. Юськевич
(ініціали, прізвище)



038928