

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Дзюра Володимир Олексійович

УДК 621.01+621.9.015+621.787.4+621.715.2

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

Спеціальність 05.02.08 – Технології машинобудування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Марущак Павло Орестович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, проректор з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
заслужений діяч науки і техніки України
Кальченко Володимир Віталійович,
Національний університет «Чернігівська політехніка»,
проректор з науково-педагогічної роботи

доктор технічних наук, професор
Гурей Ігор Володимирович,
Інститут механічної інженерії та транспорту
Національного університету «Львівська політехніка»,
професор кафедри робототехніки та інтегрованих
технологій машинобудування

доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Марчук Віктор Іванович,
Луцький національний технічний університет,
професор кафедри прикладної механіки і мехатроніки

Захист відбудеться 22 вересня 2021 р. об 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розіслано 16 серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.06
к.т.н., доц.



Ю. П. Шоловій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найбільших класів деталей у номенклатурі машинобудівних виробництв є клас «тіла обертання». Деталі цього класу, зокрема довгомірні пустотілі циліндри (гільзи гідроциліндрів автомобільних кранів, гідроциліндрів механізмів керування муфтами зчеплення, циліндрів підсилення механізмів повороту автомобілів, гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання) та диски (конусні диски варіаторних трансмісій, корпуси торцевих підшипників тощо), в основному, працюють у спряженні з іншими деталями та забезпечують передавання руху від одного рухомого об'єкта до іншого. Тому забезпечення необхідної якості робочих поверхонь цих деталей і, як наслідок, заданих експлуатаційних властивостей є важливим завданням машинобудівного виробництва.

Важливими параметрами якості обробленої поверхні є її точність і 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 забезпечуються технологічною операцією віброобкочування шляхом формування на цих поверхнях регулярних мікрорельєфів. Оцінювання експлуатаційних властивостей за параметрами якості поверхні можна проводити за профілограмою шорсткості поверхні, використовуючи групу параметрів діаграми Аббота-Фаєрстоуна. Таке оцінювання регламентоване стандартом ISO 4287 1996 й усуває необхідність у проведенні експлуатаційних випробувань.

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

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 вста-

новлення закономірностей впливу режимів оброблення походились із використанням теорії багатofакторного 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] – 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, 21, 23, 27, 30] – розроблення методу оцінювання впливу подачі на верстатах з механічними коробками подач на шорсткість поверхні, отриманої на токарних операціях; у [5, 24, 31] – 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, 15, 25, 28, 29, 32] – виведення аналітичних залежностей для визначення конструктивних параметрів інструменту; у [33–36, 40] – 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 Центральнотернопільському 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання, методи їх досягнення, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів досліджень, а також основні положення, які виносяться на захист. Наведено відомості щодо структури та обсягу роботи.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела, типові технологічні процеси та окремі технологічні операції та їх режими, які впливають на формування параметрів якості поверхонь.

Досліджуючи існуючі технологічні способи забезпечення якості робочих поверхонь машин класу «тіла обертання», зокрема довгомірних циліндричних деталей машин, доступ до яких ускладнений, встановлено, що існуючі технологічні підходи не забезпечують необхідних експлуатаційних властивостей цих поверхонь.



Рисунок 1. Гідроциліндр плунжерний КС-4574.63.900-03.00 телескопування стріли автомобільного крана виробництва «ДЗАК»



Рисунок 2. Конусні диски варіаторних трансмісій із торцевими обертовими поверхнями

Встановлено основні вимоги до параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» залежно 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. 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. Встановлено наявність технологічних та геометричних параметрів, вплив яких на параметри якості поверхні є визначальним. 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.

На основі аналізу технологій створення регулярних мікрорельєфів встановлено що регулярні мікрорельєфи, створені на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» фактично є частково регулярними. Вони мають низку суттєвих відмінностей від мікрорельєфів, створених на циліндричних поверхнях і майже не досліджені. Їх створення можливе безвібраційним способом на фрезерних верстатах з ЧПК. Однак відсутні математичні моделі для описування їх конструктивних особливостей й технологічні основи для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей поверхонь із такими мікрорельєфами. На основі цієї проблематики сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи. Встановлено, що параметри якості робочих поверхонь деталей машин досліджували закордонні та вітчизняні вчені. Дослідженням параметрів якості поверхні, сформованих на фінішних операціях технологічного процесу, присвячені праці Bartarya G., Fang, N., Hassan A.M., Hamdi A., Вітенберга Ю.Р., Добротворського С.С., Дяченко П.Е., Ісаєва А.І., Марчука В.І., Лук'янова В.С., Маталіна А.О., Попандопуло К.Х., Гаврилова А.І., Хусу А. П., Гурєя І.В., Ящеріцина П.І., Рижова Е.В., Гурєя І.В., Кальченка В.В., Ступницького В.В. Над проектуванням інструментів для обробки різанням поверхонь типу тіл обертання та дослідженням їх оптимальних параметрів працювали Луців І.В., Вовк Ю.Я., Боярський В.Г., Кірсанов С.В., Лепіхов В.Г. Математичні моделі описування регулярних мікрорельєфів розробляли Шнейдер Ю.Г., Киричок П.О., Мельников П.А., Моргунов А.П., Марущак П.О., Кузьмін Ю.П., Кривий П.Д. Розрахунком оптимальних режимів формування регулярних мікрорельєфів, їх форм та розмірів присвячені роботи Gomez-Gras G, John M.R., Wilson, A.W., Lacalle L., Lin S.C., Nagit G., Афтаназіва І.С., Киричка П.О., Кіндрачука М.В., Погодаєва В.П., Фельдмана Я.С. Проектуванням інструментів для формування регулярних мікрорельєфів присвячені праці Киричка П.О., Slavov S., Dimitrov D., Плев І., Афтаназіва І.С., Гурова Р.В., Проскуракова Ю.Г., Хмілярчука О.І., Жетесова Г.С., Одінцева Л.Г. Забезпечення заданих експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин здійснюється розробленням функціонально-орієнтованих технологічних процесів, дослідженню яких присвячені праці Ступницького В.В. та Грицяя І.Є.

Проте, незважаючи на велику кількість публікацій учених, які виконували дослідження в цьому напрямі, проблема забезпечення параметрів якості не розглядалась комплексно з урахуванням умови експлуатації й вивчена недостатньо. Тому на основі існуючої проблеми сформовано мету й завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі описано методологію проведення досліджень забезпечення якісних параметрів циліндричних поверхонь деталей класу «тіла обертання» на прикладі гільзи циліндра гідроциліндра плунжерного КС-4574.63.900-03.00 телескопування стріли автомобільного крана виробництва «ДЗАК». Для виготовлення гідроциліндрів використовують сталі марок: St 52, St 52.3, St E 460 згідно DIN 2393-1994 та DIN 17102, виготовлені в Німеччині. Для цього розглянуто

вплив технологічної спадковості на точності форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь об'єкта дослідження. Враховуючи те, що відхилення від круглості Δ_i на проміжку $[0, 2\pi]$ є величина випадкова із законом розподілу Релея, періодичну функцію $f(\Delta)$ її описування, обмежившись 10-ма гармоніками $k=[1, 10]$, подано тригонометричним рядом Фур'є.

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

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

Отримано статистичні характеристики розсіювання (таблиця 1) відхилень від круглості для кожної із 5-ти круглограм (i -го досліджуваного зразка) після j -ої технологічної операції $\bar{\Delta}_{ij}$ і $D_0(\bar{\Delta}_{ij})$ та визначено амплітуди відповідних гармонік (таблиця 2).

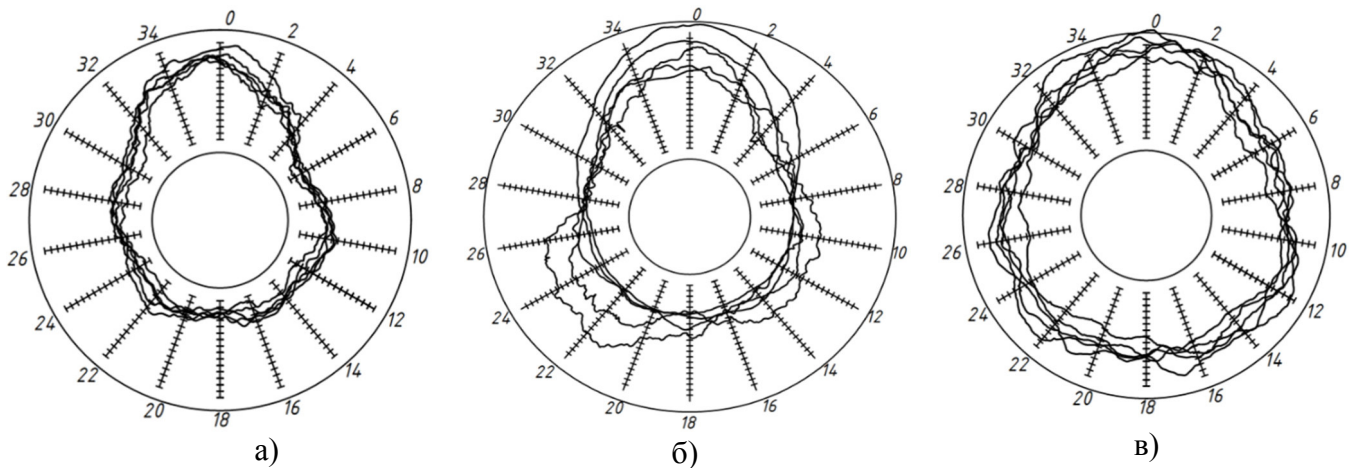


Рисунок 3. Круглограми відхилення поперечних перерізів внутрішньої циліндричної поверхні дослідних зразків гідроциліндрів $\varnothing 100$ мм після виконання технологічних операцій: а) – чорнове розточування; б) – напівчистове розточування; в) – фінішне чистове розточування

Таблиця 1. Характеристики розсіювання відхилень від круглості внутрішніх циліндричних поверхонь поперечних перерізів гільз гідроциліндрів

Технологічна операція	Середнє значення $\bar{\Delta}_{ij}$ – чисельник, мкм; середнє квадратичне відхилення σ_{0ij} – знаменник, мкм				
	Порядковий номер круглограми				
	№1	№2	№3	№4	№5
Чорнове розточування	$\frac{11,98}{11,09}$	$\frac{13,68}{138}$	$\frac{10,51}{11}$	$\frac{12,13}{123}$	$\frac{10,38}{9,97}$
	$\frac{10,97}{10,6}$	$\frac{13,34}{18,5}$	$\frac{18,17}{22,16}$	$\frac{18,03}{13,61}$	$\frac{17,54}{12,2}$
Напівчистове 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. Амплітуди гармонік відхилень від круглості внутрішніх циліндричних поверхонь, отриманих після реалізації кожної технологічної операції, апроксимовані тригонометричним рядом Фур'є.

№ операції j -ої	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

За величиною максимального значення гармонік (таблиця 2) визначали тип відхилення від круглості й, відповідно, наявність або відсутність технологічної спадковості після кожної технологічної операції. Як бачимо із таблиці 2 максимальне значення амплітуди спостерігається на першій гармоніці як після першої, так і після другої технологічної операції, що свідчить про наявність технологічної спадковості між ними. Технологічна спадковість між другою і третьою технологічними операціями не прослідковується, оскільки максимальне значення амплітуди спостерігається на третій гармоніці для операції чистового розкочування.

Запропонована методика дозволяє враховувати вплив технологічної спадковості на точність форми циліндричних поверхонь і може бути використана для виявлення шляхів забезпечення макрогеометричних параметрів якості оброблених поверхонь. Врахувавши, що випадкова величина підпорядкована закону розподілу Релея, оцінювання істотності відмінності між двома середніми квадратичними відхиленнями та математичним сподіванням здійснено за допомогою критеріїв t_s, t_k .

Таблиця 3. Значення критеріїв 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

Якщо величина критерію $t_k, t_s \geq 3$, то технологічна операція вважається ефективною, при $t_k, t_s < 3$ – неефективною.

Проведено аналіз висотного параметра шорсткості поверхні гільзи гідроциліндра, отриманої після кожної операції технологічного процесу з метою оптимізації його структури на основі аналізу забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей.

Таблиця 4. Структура технологічних операцій виготовлення гільзи гідроциліндра КС-4574.63.900 випускання стріли автомобільного крана КТА-25

Технологічна операція	Внутрішній діаметр D , мм	Шорсткість поверхні відповідно до тех. документації R_a , мкм.	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Середнє значення
Чорнова обробка	Ø98,3Н11	10	7,36	7,48	9,84	8,22
Напівчистова обробка	Ø99,5Н11	5	7,44	4,86	8,8	7,03
Фінішна обробка	Ø100Н9	0,32	0,16	0,16	0,24	0,18

Шорсткість зразків визначали на оптичному інтерферометрі моделі NewView 7300 виробництва Zygo (США). Поверхні зразків досліджували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP із системою спектрального мікроаналізу INCA Energy 350.

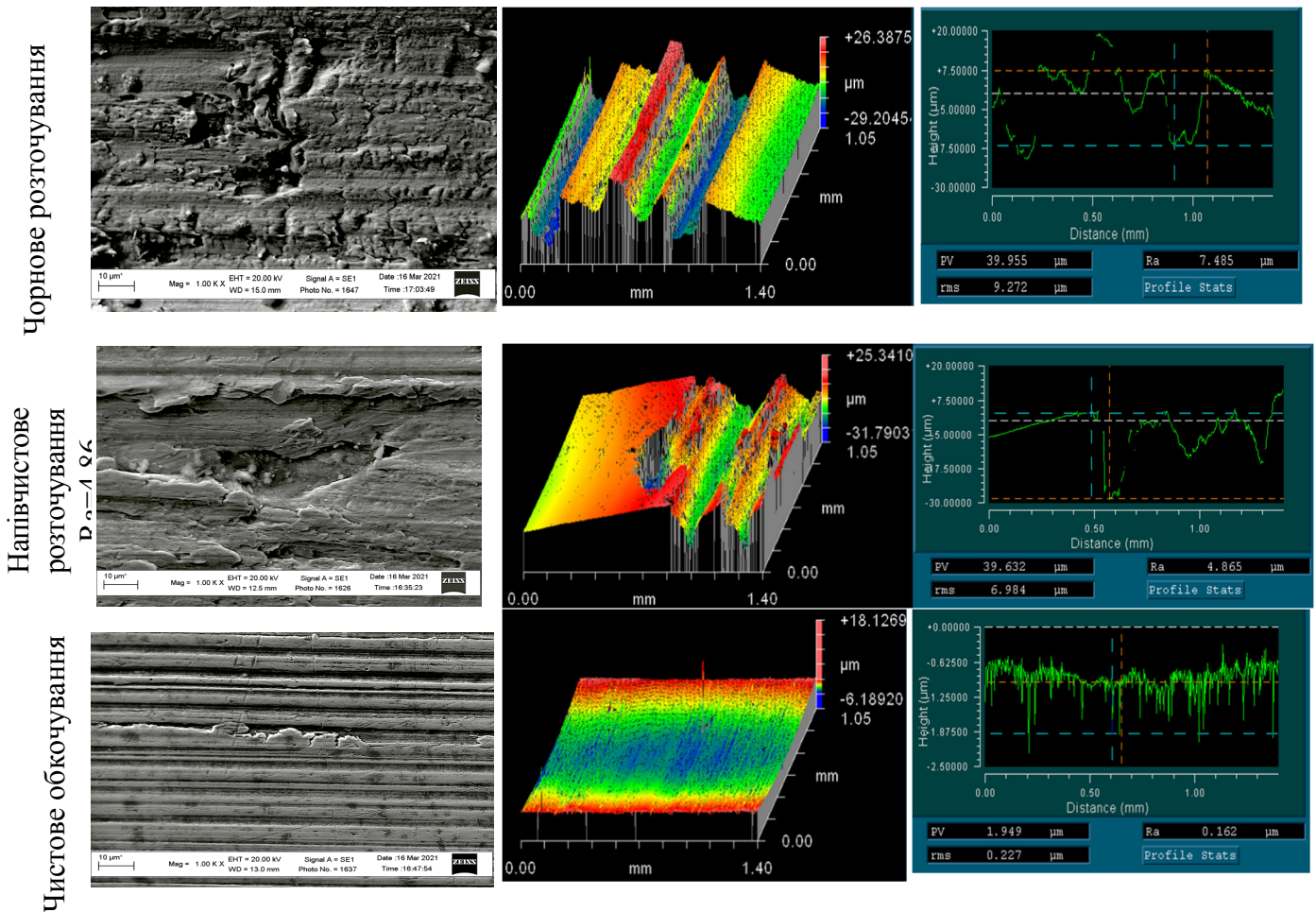


Рисунок 4. Топографія поверхонь після операцій технологічного процесу

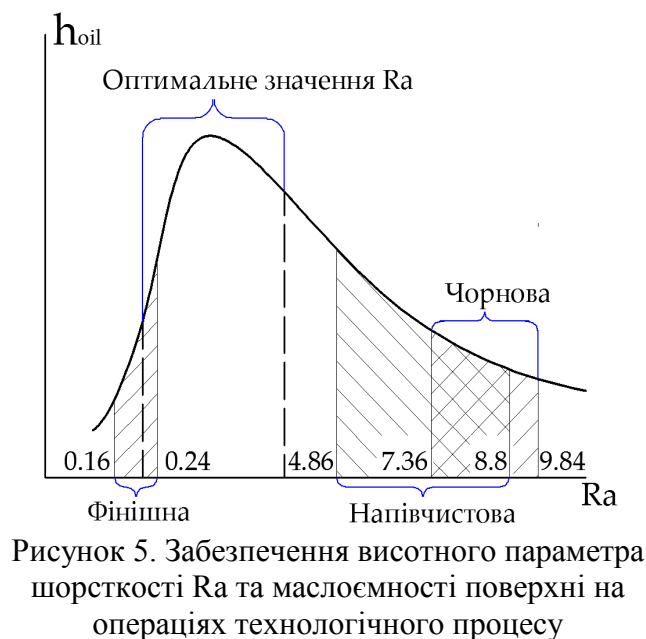


Рисунок 5. Забезпечення висотного параметра шорсткості Ra та маслоємності поверхні на операціях технологічного процесу

За результатами аналізу мікрорельєфу (табл. 4) встановлено, що числові значення висотного Ra та крокового S параметрів шорсткості поверхні, отримані після напівчистового розточування частково задовольняють рекомендовані для поверхні, підготовленої для чистового оброблення.

Однак неоднорідна структура матеріалу поверхні гільзи, отримана на цій операції та глибокі западини, які спостерігаються на 3D фотографіях поверхні після фінішної операції обкочування, при

експлуатації гільзи будуть локальними дефектами, які через нетривалий період експлуатації призведуть до утворення задирів і втрати герметичності з'єднання.

Запропоновано експлуатаційні властивості поверхні, отриманої після чистового оброблення (рис. 4), визначати за допомогою параметрів діаграми Аббота-Фаерстоуна. За результатами такого аналізу встановлено, що здатність поверхні утримувати масляну плівку недостатня, тому задані експлуатаційні властивості для відповідних умов експлуатації не забезпечені, не зважаючи на задовільні числові значення параметрів шорсткості.

Тому для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей операцію напівчистового розточування запропоновано замінити операцією чистового розточування, а фінішну операцію обкочування відповідно – на операцію віброобкочування із формуванням регулярного мікрорельєфу.

Для підвищення продуктивності токарних операцій шляхом призначення прогресивніших режимів оброблення, зокрема осьової подачі інструменту, розроблено метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні, сформованої точінням. Метод ґрунтується на статистичному оцінюванні відмінностей мікрогеометричного параметра якості поверхні R_a за різних значень осьової подачі, яку представляли у вигляді випадкової величини із нормальним законом розподілу. Для цього у ймовірно-статистичному аспекті, використовуючи теорію малої вибірки, визначали вибіркові характеристики статистичних рядів параметра шорсткості R_a , отриманого при проточуванні дослідних зразків із наявними у верстатів токарної групи осьовими подачами.

Експериментальні дослідження впливу осьової подачі на параметр шорсткості R_a здійснено для матеріалів двох груп сплавів: Fe-C, зокрема: сталі 45, сталі 30ХГСА, чавуну КЧ30-6 і кольорових сплавів, зокрема: силуміну АЛ4; дюралюмінію Д16Т; латуні ЛС ЛС63-3 (табл. 5–6).

Таблиця 5. Суттєвість відмінностей середнього значення R_a за критерієм Стьюдента для сталі 30ХГСА

Параметр	Паспортні значення осьових подач верстату, мкм/об									
	20	30	50	60	70	80	88	100	125	150
\bar{R}_a , мкм	1,44	1,52	1,48	1,58	1,59	1,72	2,38	2,54	3,84	4,66
Істотність зміни	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+

Сформовані статистичні ряди параметра R_a перевіряли на однорідність за критерієм Греббса, а стабільність технологічних операцій – за коефіцієнтом варіацій. Отримані вибіркові характеристики оцінювали за критерієм Стьюдента та Фішера.

Результати аналізу параметра шорсткості R_a свідчать про це, що для групи сплавів Fe-C існує діапазон чистових подач, збільшення яких не призводить до суттєвого (за критерієм Стьюдента) збільшення параметра шорсткості R_a , що створює можливості для роботи на прогресивніших режимах оброблення.

Таблиця 6. Суттєвість відмінностей середнього значення Ra за критерієм Стьюдента

Параметр	Паспортні значення осьових подач верстату, мкм/об									
	50	60	75	90	100	125	150	175	200	250
Чавун КЧ 30-6										
\bar{R}_a , мкм	4,21	4,13	3,97	3,57	3,41	3,47	3,68	4,37	5,18	5,94
Істотність зміни	–	–	–	–	–	–	+	+	+	+
Сталь 45										
\bar{R}_a , мкм	3,28	3,39	3,45	3,73	3,08	1,36	1,67	2,39	2,54	3,85
Істотність зміни	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+
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
Істотність зміни	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+
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	–
Істотність зміни	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–
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
Істотність зміни	–	–	+	+	+	+	+	+	+	+

Відмінність середніх значень: істотна “+”; неістотна “–”.

Використавши програмне забезпечення OriginPro 8, отримали аналітичні вирази, що описують залежність шорсткості поверхні експериментальних зразків від осьової подачі.

Проведено дослідження впливу форми та розмірів поперечних перерізів поверхонь деталей класу «тіла обертання» на їх шорсткість, отриману при токарній обробці. Дослідні зразки були виготовлені зі сталі 45. Внутрішні й зовнішні діаметри дослідних зразків (рис. 6) та частоти обертання шпинделя верстату при їх обробленні були підібрані таким чином (табл. 7), що швидкість різання становила однакове числове значення – 100 м/хв.

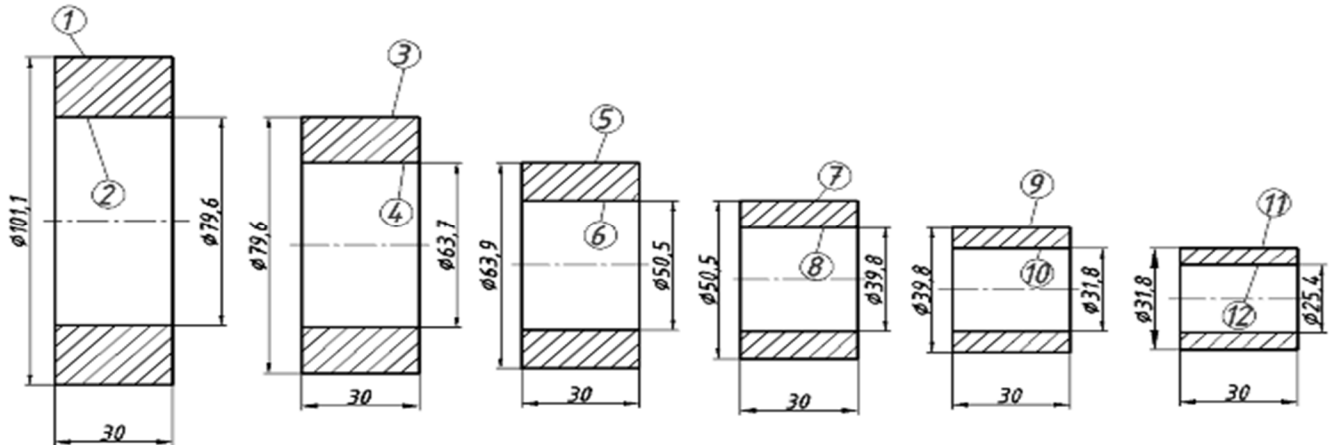


Рисунок 6. Комплект дослідних зразків

$$V_{i=1,3..11} = V_{j=2,4..12} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = 100 \text{ м/хв.} \quad (2)$$

Таблиця 7. Характеристики циліндричних поверхонь (D – зовнішніх, d – внутрішніх) дослідних зразків та відповідних їм частот обертання n

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 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	1000
	Внутрішні поверхні, n_j , об/хв	400	500	630	800	1000	1250
Елементи режиму обробки	Глибина різання, t , мм	1/0,5					
	S , подача	0,21/0,12					
	V , швидкість	$100^{+7}/100^{+2}$					

При цьому всі інші параметри процесу різання (режими оброблення та геометричні параметри інструменту) були однаковими. Після проточування визначали по десять значень висотного параметра шорсткості R_a на кожній поверхні, формуючи з них статистичні ряди, а також вибіркові характеристики цих статистичних рядів.

Суттєвість відмінностей між середніми значеннями параметра R_a для зовнішніх і внутрішніх поверхонь з однаковими діаметрами перевіряли за критерієм Стюдента. (табл. 8).

Таблиця 8. Значення критеріїв Стюдента для характеристик розсіювання випадкових величин за середнім значенням R_a зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь з однаковими розмірами

Діаметри оброблюваних циліндричних поверхонь, мм				
79,6	63,9	50,5	39,8	31,8
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 “-”				
$P(t_k) = 0$ “+”	$P(t_k) = 0$ “+”	$P(t_k) = 0$ “+”	$P(t_k) = 0,003$ “+”	$P(t_k) = 0$ “+”

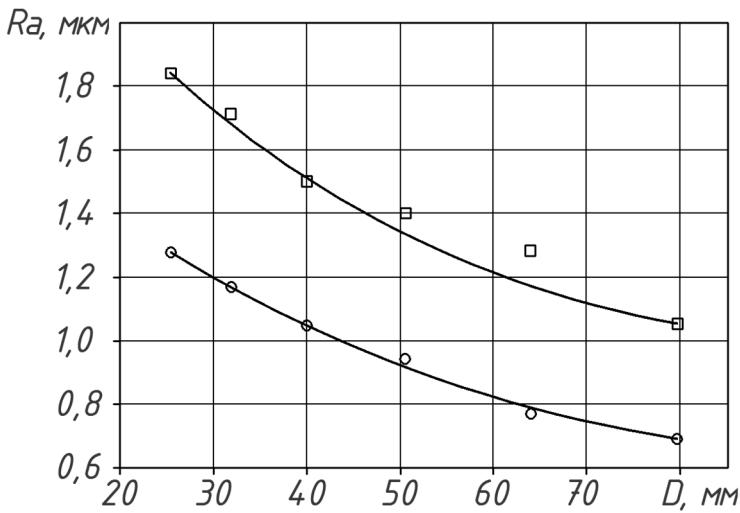


Рисунок 7. Залежність середнього значення шорсткості R_a циліндричних поверхонь від діаметра поверхні: ● — для зовнішніх циліндричних поверхонь; ■ — для внутрішніх циліндричних поверхонь

зокрема маслоємності та зносостійкості поверхонь деталей класу «тіла обертання», запропоновано в якості фінішних операцій використовувати операцію віброобточування із формуванням регулярного мікрорельєфу. Процес формування РМР є вібраційним і супроводжується такими формувальними рухами: обертотним рухом D_n , заготовки, рухом подачі інструменту D_s та зворотно-поступальним осциляційним рухом інструменту D_i . Цей процес має певні особливості, зокрема: циліндрична оброблювальна поверхня обертається навколо нерухомої осі; взаємодія оброблювальної поверхні із кулькою віброобточника є точковою, до того ж точка контакту вказаних тіл зміщується у поздовжньому та радіальному напрямках.

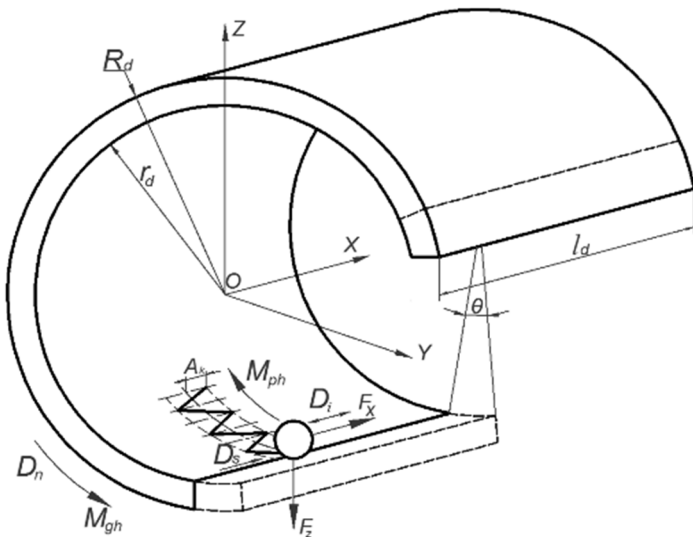


Рисунок 8. Схема переносного обертального руху заготовки при формуванні регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні

Основні припущення, які лежать в основі опису переносного руху заготовки (рис. 8) наступні: а) точкова дія тіла, яке наносить мікрорельєф на внутрішню циліндричну його поверхню; б) привідний момент M_{gh} , який спонукає заготовку

Встановлено, що величина діаметра та форма поверхні суттєво впливають на значення параметра R_a та потребують урахування при визначенні режимів обробки поверхонь деталей класу «тіла обертання».

У третьому розділі розглянуто динаміку процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях вібраційним обточуванням.

Як було обґрунтовано вище для забезпечення оптимальних експлуатаційних властивостей,

Для опису його динаміки у роботі розглянуто такі складові:

- обертотний рух навколо горизонтальної осі як абсолютно твердого тіла;

- відносний рух, зокрема поздовжні коливання заготовки в процесі формування регулярного мікрорельєфу та крутильні її коливання навколо горизонтальної осі.

Проведено дослідження впливу зовнішніх чинників на обертотний рух заготовки, на внутрішній циліндричній поверхні якої формують регулярний мікрорельєф.

обертатись навколо горизонтальної осі, момент (M_{ph}) дії віброобкатника на внутрішню поверхню заготовки залежить від таких чинників – зусилля притискання, форми віброобкатника, твердості матеріалу оброблювальної поверхні та ін. Нижче приймають, що останні чинники враховуються коефіцієнтом f_{ph} ($M_{ph} = F_z \cdot r_d \cdot f_{ph}$).

Закон обертового руху заготовки описується залежністю

$$\theta(t) = \omega_0 t - \frac{A_k}{p^2 I_{ox}} (\sin pt - pt), \quad (3)$$

де ω_0 – початкова кутова швидкість заготовки, A_k – амплітуда коливань віброобкатника, p – частота коливань.

Розглянуто динаміку процесу поздовжнього руху заготовки в процесі формування регулярного мікрорельєфу. Математичною моделлю поздовжніх коливань однорідного пружного тіла за умови, що пружні його властивості задовольняють нелінійному технічному закону пружності, а сила в'язкого тертя пропорційна швидкості ϵ , за певних крайових умов, диференціальне рівняння

$$u_{tt}(x,t) - \beta^2 u_{xx}(x,t) = \epsilon \left[\eta u_t(x,t) + \hat{\beta} (u_x(x,t))^2 u_{xx}(x,t) \right] + \xi(x,t), \quad (4)$$

в якому $u(x,t)$ поздовжнє переміщення перерізу тіла з координатою x в довільний момент часу t , η – коефіцієнт пропорційності у силі в'язкого тертя; $\hat{\beta}$ коефіцієнт,

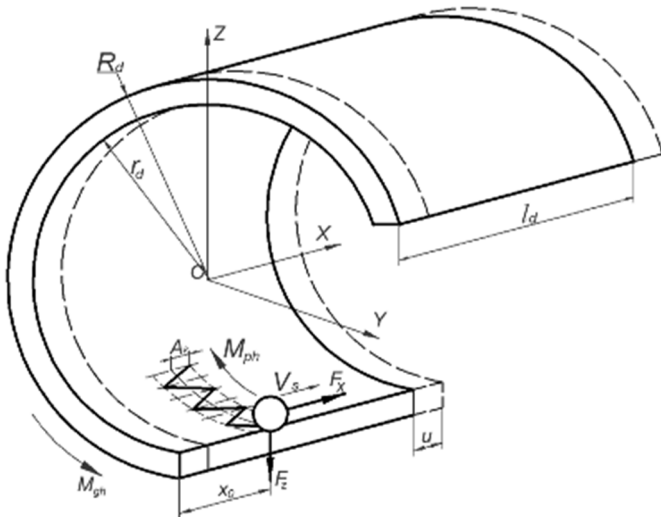


Рисунок 9. Розрахункова схема для побудови динамічної моделі поздовжнього руху заготовки в процесі формування регулярного мікрорельєфу

який характеризує відхилення пружних властивостей тіла від лінійного закону; ϵ – малий параметр, що вказує на малу величину останніх двох сил порівняно із другим доданком лівої частини рівняння. Для процесу нанесення мікрорельєфу на поверхню заготовки маємо дещо складніший випадок, зокрема взаємодія віброобкатника із поверхнею заготовки має точковий характер і точка прикладання вказаної дії неперервно переміщається вздовж твірної внутрішньої поверхні оброблювального тіла. Тому вказану особливість треба враховувати функцією $\xi(x,t)$.

Диференціальне рівняння відносних поздовжніх коливань набуло вигляду

$$u_{tt} - \beta^2 u_{xx} = \epsilon \left[\eta u_t + \hat{\beta} (u_x)^2 u_{xx} \right] + F_x \bar{f}_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - V_s t), \quad (5)$$

де $x_0 + V_s \cdot t$ – координата контакту віброобкатника з поверхнею; \bar{f}_{ph} – коефіцієнт, що враховує твердість матеріалу заготовки.

Отримані результати дозволяють відносні поздовжні коливання заготовки, на внутрішню поверхню якої наноситься мікрорельєф, записати у вигляді

$$u(x,t) = \sum_k \sin \frac{k\pi}{l_d} x \left\{ S_{0k} \sin(\omega_k t + \varphi_{0k}) + \frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} F_x \left(\frac{k}{l_d} \beta\right)^{-1} \int_0^t \sin \frac{k(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{l_d} \sin \left(\frac{k}{l_d} \beta(t-\tau)\right) d\tau + \right. \\ \left. + \frac{l}{k\pi\beta} \int_0^t \cos \left(\beta \frac{k\pi}{l_d} (t-\tau)\right) \Theta(\tau) d\tau \right\} \quad (6)$$

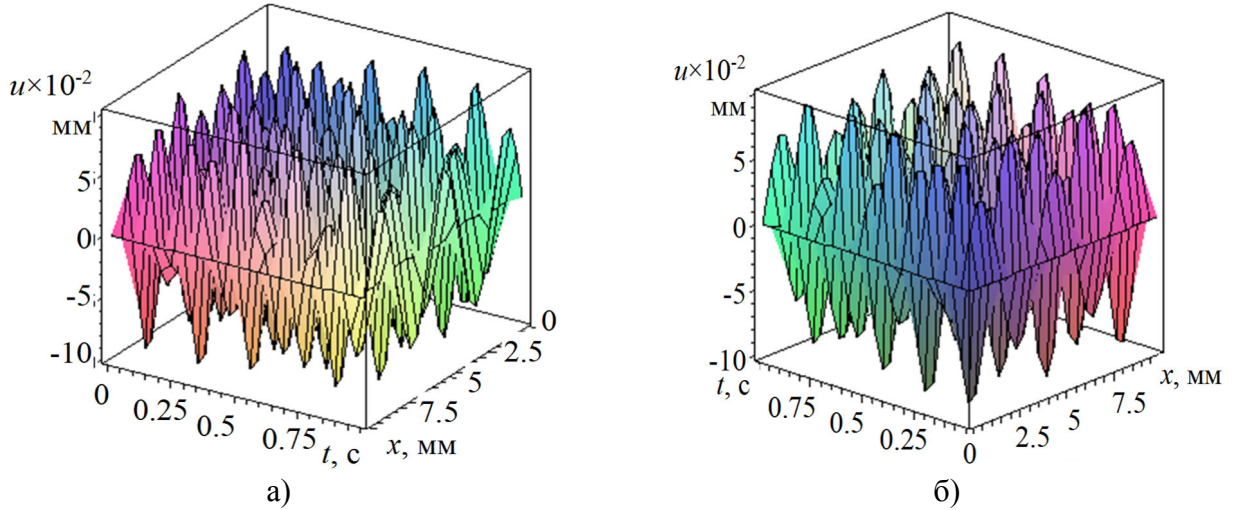


Рисунок 10. Зміна в часі величини повздовжніх коливань заготовки в процесі формування РМР при: $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$; $F_x = 300 \text{ Н}$; $V_s = 0,01 \text{ м/с}$; $l_d = 1 \text{ м}$
а) $\bar{f}_{ph} = 1$; б) $\bar{f}_{ph} = 0,5$

Розглянуто зміну в часі крутильних коливань заготовки при формуванні регулярного мікрорельєфу (рис. 11). Позначивши $\varphi(x, t)$ – кут закручування нормального перерізу циліндричної поверхні деталі з координатою x у довільний момент часу t , диференціальне рівняння крутильних коливань за прийнятих раніше припущень щодо пружних та дисипативних сил набуває вигляду

$$\varphi_{tt} - \alpha^2 \varphi_{xx} = \varepsilon \left[\hat{\eta} \varphi_t + \hat{\beta} (\varphi_x)^2 \varphi_{xx} \right] + F_z r f_{ph} \delta(x - \bar{x}_0 - Vt), \quad (7)$$

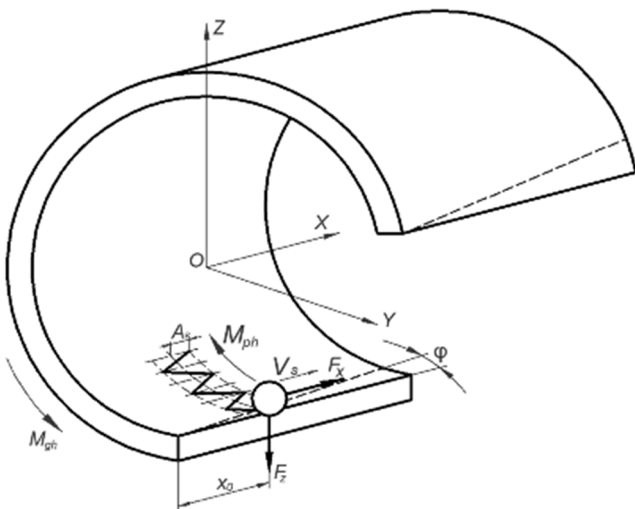


Рисунок 11. Розрахункова схема динамічної моделі відносних крутильних коливань деталі в процесі формування регулярного мікрорельєфу

де $\alpha^2 = \frac{G}{\rho}$, $M_{rh} = \varphi_x G J_p$, 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; δ – дельта функція відповідного аргументу; $\hat{\eta}$ $\hat{\beta}$ – коефіцієнти, які характеризують силу опору та нелінійну складову відновлювальної сили.

Приймається, що величини F_x та F_z дії на поверхню заготовки є сталими по величині.

Величину кута закручування заготовки в процесі формування регулярного мікрорельєфу можна визначити згідно залежності

$$\varphi(x,t) = \left\{ \frac{1}{l_d} \bar{f}_{ph} r_d F_Z \left(\frac{3\pi}{2l} \alpha \right)^{-1} \int_0^t \sin \frac{3\pi(\bar{x}_0 + V_s \tau)}{2l_d} \sin \left(\frac{3}{2l_d} \pi \alpha (t - \tau) \right) d\tau + \frac{2l_d \varepsilon}{(2k+1)\pi \alpha} \int_0^t \cos \left(\pi \alpha \frac{3}{2l} (t - \tau) \right) \bar{\Theta}(\tau) d\tau \right\} \quad (8)$$

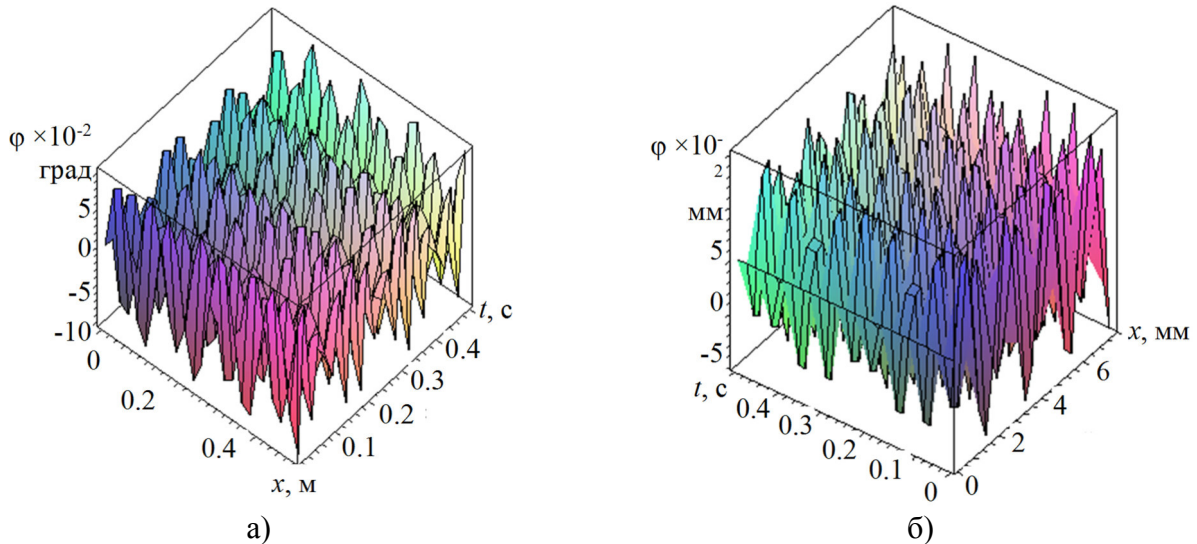


Рисунок 12. Зміна в часі відносного кута закручення деталі при формуванні РМР при:

$$G = 8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2; \bar{A} = 0,014 \text{ м}^2, F_X = 300 \text{ Н}; V = 0,01 \text{ м/с}; \bar{f}_{ph} = 0,75 \quad r = 0,12 \text{ м}, \omega = 3$$

$$\text{а) } l_d = 0,5 \text{ м; б) } l_d = 0,75 \text{ м}$$

Результати наведених досліджень свідчать про те, що при рекомендованих режимах формування мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях заготовок у вигляді пустотілих циліндрів величина поздовжніх та крутильних коливань є незначною і їх впливом на площу сформованого мікрорельєфу можна знехтувати.

У четвертому розділі наведено наукові основи формування частково регулярних мікрорельєфів на торцевих поверхнях тіл обертання. Проведені дослідження дозволяють створити класифікацію ЧРМ, які сформовані на ТПТО. Класифікація ЧРМ на ТПТО побудована 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.

Розроблена класифікація є основою для математичних моделей частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання. Вихідними параметрами для моделювання ЧРМ на ТПТО є: амплітуда A_k канавки; форма профілю канавок; осьовий крок канавок S_o ; кутовий крок канавок φ_k ; радіус відбитка канавки r_k ; кількість елементів ЧРМ n_{el} на проміжку $[0, 2\pi]$; параметр, що характеризує розміщення осьових ліній симетрії канавок γ_d град. При цьому вперше було введено поняття кутового кроку канавок φ_k ЧРМ як єдиного параметра, який забезпечує регулярність мікрорельєфу при зміні їх амплітуди.

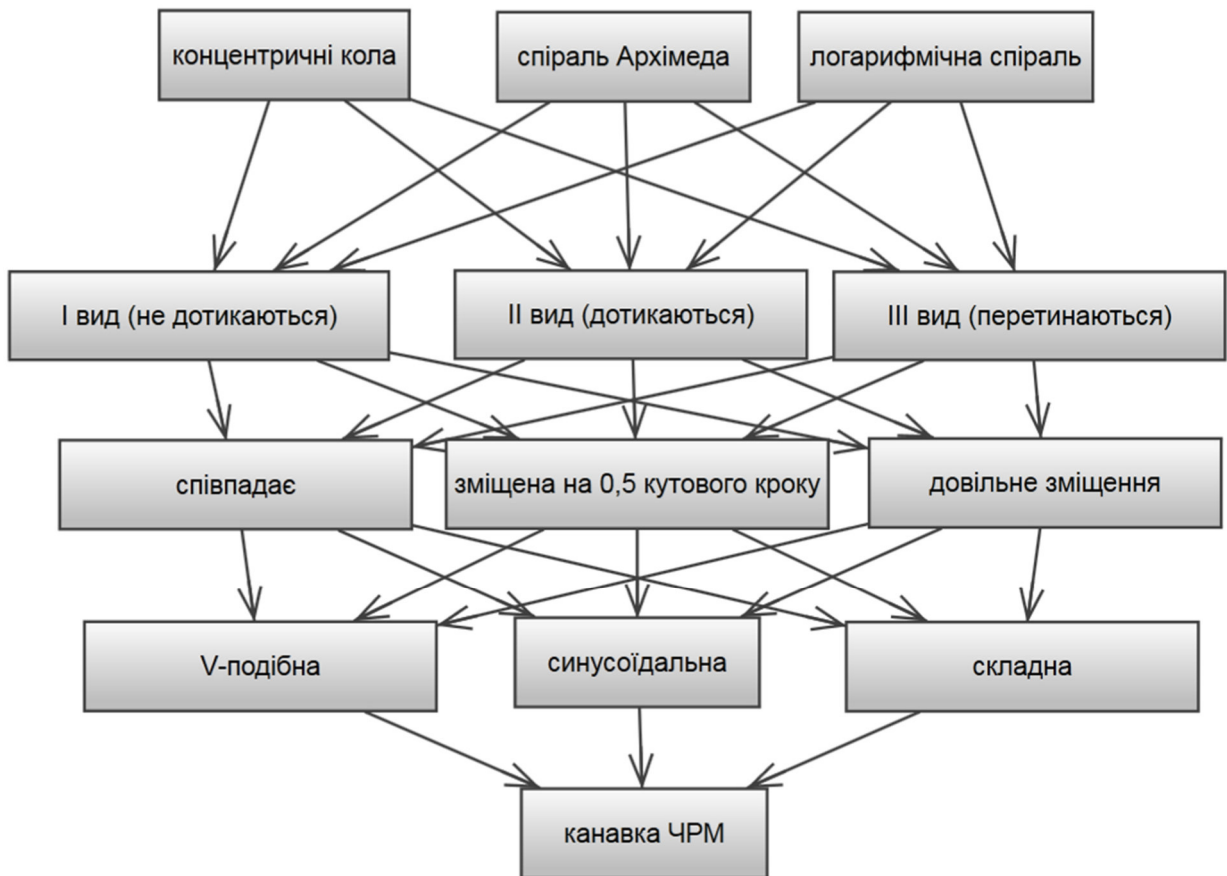


Рисунок 13. Схема утворення множини варіантів канавок ЧРМ, що сформовані на торцевих поверхнях тіл обертання

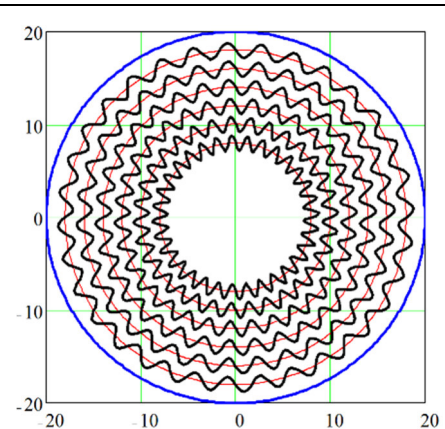
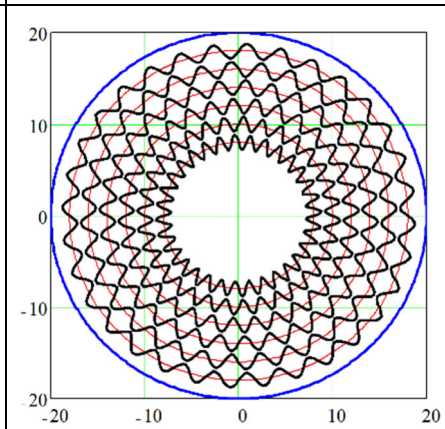
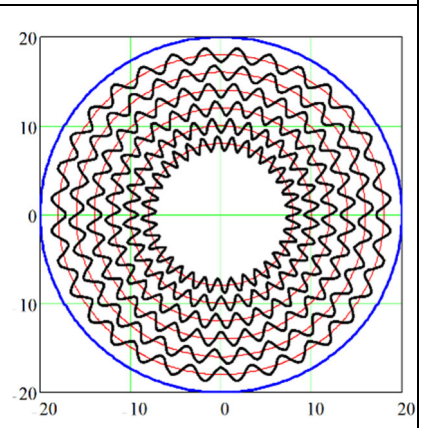
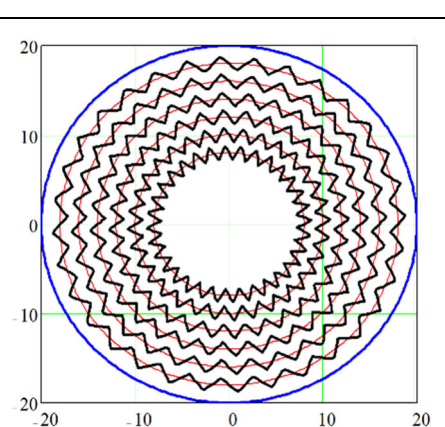
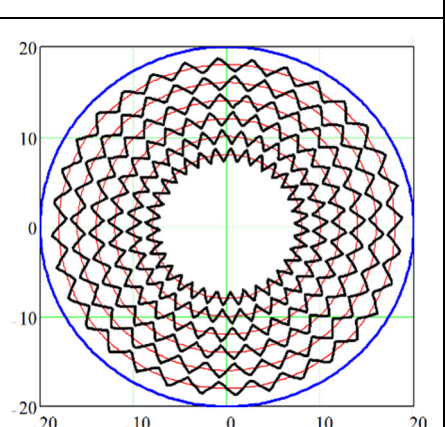
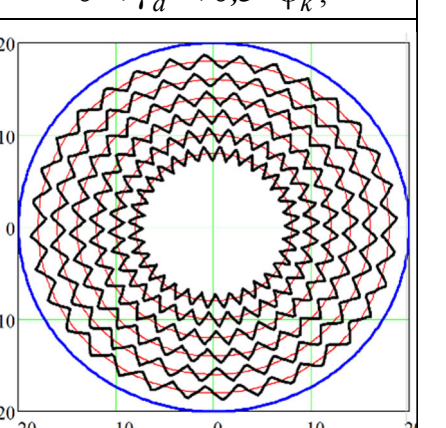
Розроблено схему утворення та встановлено умови існування множини варіантів канавок частково регулярних мікрорельєфів, що сформовані на торцевих поверхнях тіл обертання.

Вперше за допомогою аналітичних залежностей визначено характеристики канавок ЧРМ (таблиця 9). За допомогою блочного підходу побудовано математичні моделі частково-регулярних мікрорельєфів, які описують множину їх варіантів, враховуючи такі їх характеристики, як: форма осьових ліній неперервних регулярних мікронерівностей, вид мікрорельєфу, розміщення осьових ліній симетрії канавок та їх форма.

Для моделювання синусоїдальної форми канавки використовували функцію гармонічних коливань за законом синуса, яке записували за допомогою рівнянь $x_k = A_k \cdot \cos(n_{el} \cdot \varphi_i)$, $y_k = A_k \cdot \sin(n_{el} \cdot \varphi_i)$, де y_k , x_k – координати осьової лінії неперервної регулярної мікронерівності канавки за відповідного кута 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 $\varphi_i = \varphi_k$.

Графічні зображення для ЧРМ I виду для V-подібної та синусоподібної форм канавок, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» для різних форм осьових ліній неперервних регулярних мікронерівностей наведено в таблиці 9.

Таблиця 9. Математичні моделі ЧРМ, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання»

Частково регулярний мікрорельєф		
З виконанням осьових ліній НРМ по концентричних колах, синусоподібної, I виду		
$r_n = r_{n-1} + S_o$ $\begin{cases} x_{in} = r_n \cdot \cos(\varphi_i) \\ y_{in} = r_n \cdot \sin(\varphi_i) \\ x_k = A_k \cdot \sin((\varphi_i + \gamma_d) \cdot n_{en}) \cdot \cos(\varphi_i) + x_{in} \\ y_k = A_k \cdot \sin((\varphi_i + \gamma_d) \cdot n_{en}) \cdot \sin(\varphi_i) + y_{in} \end{cases}$		
$\gamma_d=0$	$\gamma_d=0,5 \cdot \varphi_k$	$0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k$;
		
З виконанням осьових ліній НРМ по концентричних колах, V-подібної форми, I виду		
$r_n = r_{n-1} + S_o$ $\begin{cases} x_{in} = r_n \cdot \cos(\varphi_i) \\ y_{in} = r_n \cdot \sin(\varphi_i) \\ x_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin[\sin((\varphi_i + \gamma_d) \cdot n_{en})] \cdot \cos(\varphi_i) + x_{in} \\ y_k = 0,2 \cdot \pi \cdot A_k \cdot \arcsin[\sin((\varphi_i + \gamma_d) \cdot n_{en})] \cdot \sin(\varphi_i) + y_{in} \end{cases}$		
$\gamma_d=0$	$\gamma_d=0,5 \cdot \varphi_k$	$0 < \gamma_d < 0,5 \cdot \varphi_k$;
		

Отримано залежності, які описують взаємозв'язок між геометричними параметрами канавок частково регулярного мікрорельєфу V-подібної форми, сформованого на торцевій поверхні тіла обертання на основі вперше введеного

поняття кутового кроку.

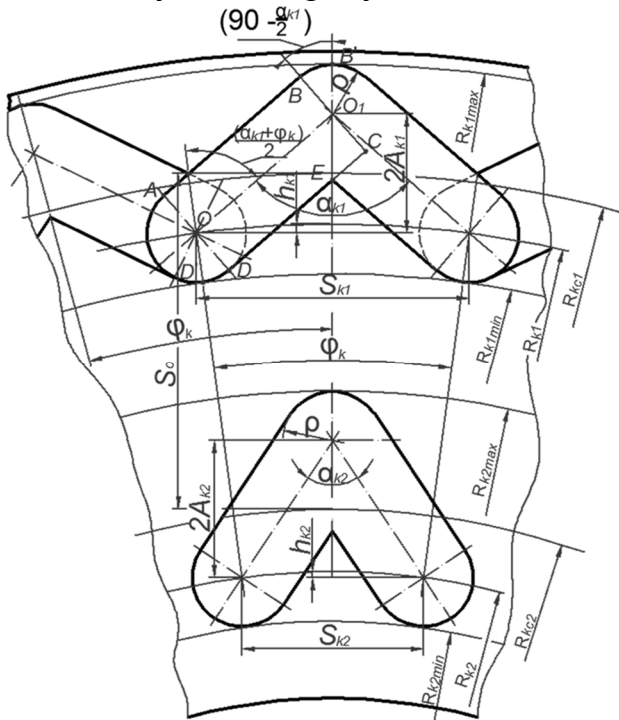


Рисунок 14. Розрахункова схема для визначення площі елементів канавок V-подібної форми ЧРМ, сформованого на торцевій поверхні

Виведено аналітичну залежність для визначення площі елемента канавки V-подібної форми ЧРМ, сформованого на торцевій поверхні тіла обертання залежно від його геометричних параметрів.

$$F_{el} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot A_k \cdot \pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_k - 0,5\phi_k)}{\cos(\alpha_k/2) \cdot 180^\circ} - \rho_k^2 \left[\text{ctg}\left(\frac{\alpha_k + \phi_k}{2}\right) + \text{ctg}\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \right] \quad (9)$$

За однакових технологічних режимів оброблення (рис. 15), площа елементів канавок ЧРМ буде змінюватися, зокрема в діапазоні значень параметра R_k у межах від 40 до 160 мм значення площі елемента канавки для однакових технологічних режимів оброблення може зрости від 3 до 6 разів.

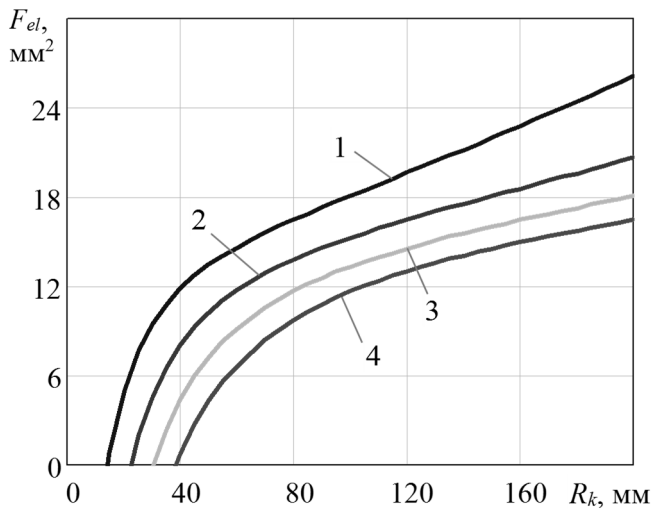


Рисунок 15. Залежність площі елемента ЧРМ від радіуса R_k для $A_k=2$ мм, $\rho_k=1$ мм з різними значеннями кількості елементів N_{el} :
1 – 120; 2 – 180; 3 – 240; 4 – 300

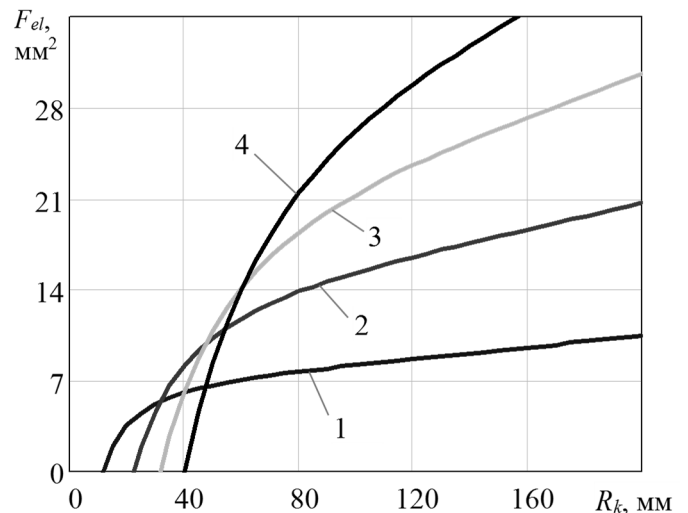


Рисунок 16. Залежність площі елемента ЧРМ від радіуса R_k для $N_{el}=180$, $A_k=2$ мм з різними значеннями радіуса канавки ρ_k :
1 – 0,5мм; 2 – 1мм; 3 – 1,5мм; 4 – 2мм

Для забезпечення стабільних фізико-механічних властивостей робочої поверхні з ЧРМ площа елементів канавок повинна бути однаковою. Для цього доцільною є зміна параметра A_k – амплітуди коливань віброобкатника залежно від величини параметра R_k . Найбільший вплив на зміну площі елемента канавки ЧРМ, сформованого на торцевій поверхні тіла обертання, має зміна величини радіуса канавки ρ_k (рис. 16).

Проведено визначення оптимальних геометричних параметрів канавок частково

регулярного мікрорельєфу I типу зі співвісними канавками, сформованого на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання» з метою забезпечення однакової відносно площі мікрорельєфу. Для цього розглянуто схеми взаємного розміщення канавок мікрорельєфу V-подібної форми.

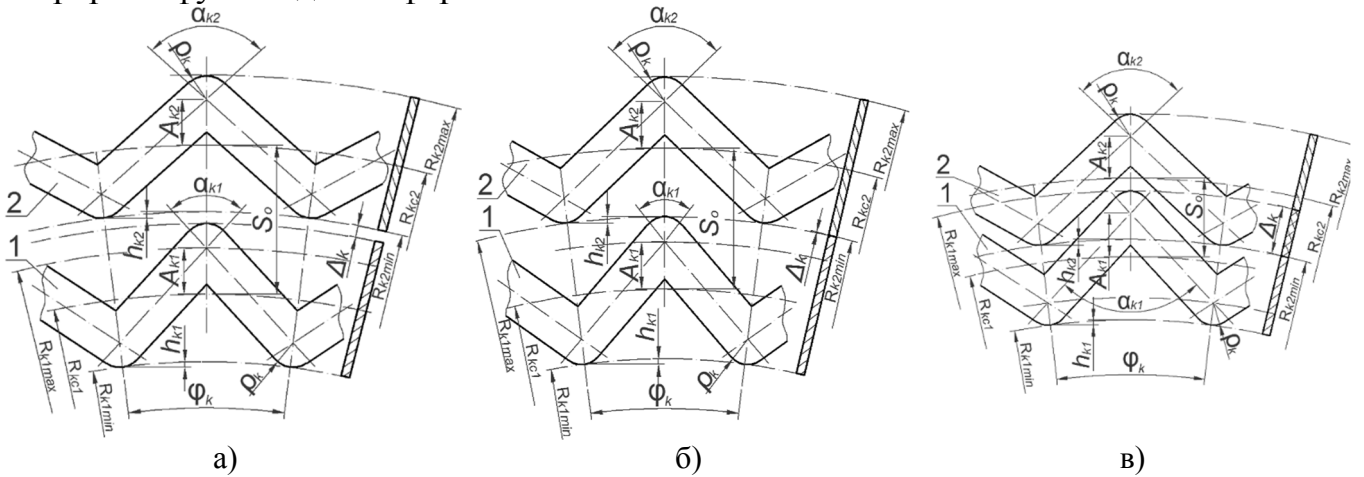



Рисунок 17. Схема розміщення канавок частково регулярного мікрорельєфу, сформованого на торцевих поверхнях тіла обертання:

- а) розміщення канавок з параметром $\Delta_k > 0$; б) розміщення канавок з параметром $\Delta_k = 0$;
в) розміщення канавок з параметром $\Delta_k < 0$;  – діапазон значень діаметрів торцевої поверхні тіла обертання, на якій розміщені канавки ЧРМ

Встановлено, що можливі три схеми взаємного розміщення (рис. 17) канавок відносно осевого кроку S_o канавки ЧРМ і характеризуються параметром Δ_k : $\Delta_k > 0$; $\Delta_k = 0$; $\Delta_k < 0$.

Залежність для забезпечення однакової відносно площі ЧРМ

$$\frac{F_{el1} \cdot n_{el1}}{\pi \cdot (R'_{k1max}{}^2 - R'_{k1min}{}^2)} = \frac{F_{el2} \cdot n_{el2}}{\pi \cdot (R'_{k2max}{}^2 - R'_{k2min}{}^2)}, \quad (10)$$

де $R'_{ki max}$, $R'_{ki min}$ – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри, які описують межі i -тих канавок з врахуванням параметра Δ_k .

Значення параметрів R'_{kmax} та R'_{kmin} для канавок, розміщених на різній відстані до центра обертання ТПТО визначали як

$$F_{el1} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot A_{k1}}{\cos(\alpha_{k1}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_k - 0,5\varphi_k)}{180} - \rho_k^2 \left[\text{ctg} \left(\frac{\alpha_{k1} + \varphi_k}{2} \right) + \text{ctg} \left(\frac{\alpha_{k1}}{2} \right) \right] \quad (11)$$

Записано значення A_{k2}

$$A_{k2} = \frac{(R_{kc1} + S_o) \cdot \text{tg}(\varphi_k/2)}{2 \text{tg}(\alpha_{k2}/2) + \text{tg}(\varphi_k/2)} \quad (12)$$

Формулу для визначення площі канавки, амплітуда якої невідома, записано у вигляді

$$F_{el2} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot (R_{kc1} + S_o) \cdot \text{tg}(\varphi_k/2)}{[2 \text{tg}(\alpha_{k2}/2) - \text{tg}(\varphi_k/2)] \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k2} - 0,5\varphi_k)}{180} - \rho_k^2 \left[\text{ctg} \left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2} \right) + \text{ctg} \left(\frac{\alpha_{k2}}{2} \right) \right] \quad (13)$$

Оскільки $n_{el} = \text{const}$, отже

$$\frac{\left[\frac{8 \cdot A_{k1}}{\cos(\alpha_{k1}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k (180 - \alpha_{k1} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k \left[\text{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1} + \varphi_{k1}}{2}\right) + \text{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \right] \right]}{\left(R_{k1max}^2 - R_{k1min}^2 \right)} =$$

$$= \frac{\left[\frac{8 \cdot (R_{kc1} - S_o) \cdot \text{tg}(\varphi_k/2)}{2\text{tg}(\alpha_{k2}/2) - \text{tg}(\varphi_k/2)} \cdot \cos(\alpha_{k2}/2) + \frac{\pi \cdot \rho_k (180 - \alpha_{k2} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k \left[\text{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2}\right) + \text{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \right] \right]}{\left(R_{k2max}^2 - R_{k2min}^2 \right)}$$

Для цього вихідні параметри встановимо такими: 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 $\varphi = [0 \dots 2\pi]$, $\rho_k = 0,5$ мм. Точність розрахунків встановлено на рівні 0,0001.

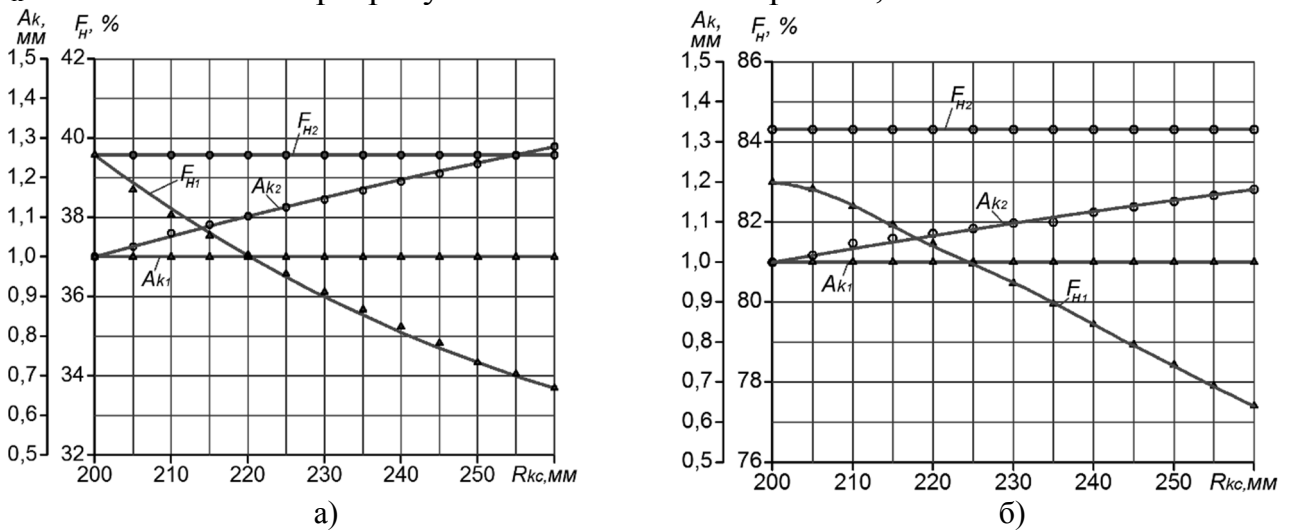


Рисунок 18. Залежність відносної площі віброобробчування F_n від амплітуди коливань A_k на різній відстані від центра обертання ППТО за: а) $\rho_k = 0,5$ мм; б) $\rho_k = 1,25$ мм

Отримані графічні залежності показують однаковий характер зміни відносної площі мікрорельєфу F_n від амплітуди коливань A_k на різній відстані від центра обертання торцевої поверхні при різних значеннях параметра ρ_k .

Встановлено, що постійне значення амплітуди коливань призводить до зміни відносної площі віброобробчування 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.

Це підтверджує суттєвий вплив параметра ρ_k на зміну відносної площі мікрорельєфу навіть за малого діапазону значень параметра R_{kc} . Отримані залежності забезпечують формування частково регулярних мікрорельєфів з канавками V-подібної форми на торцевих поверхнях із однаковою відносною площею, що забезпечує стабільні фізико-механічні властивості в будь-якій частині цієї поверхні.

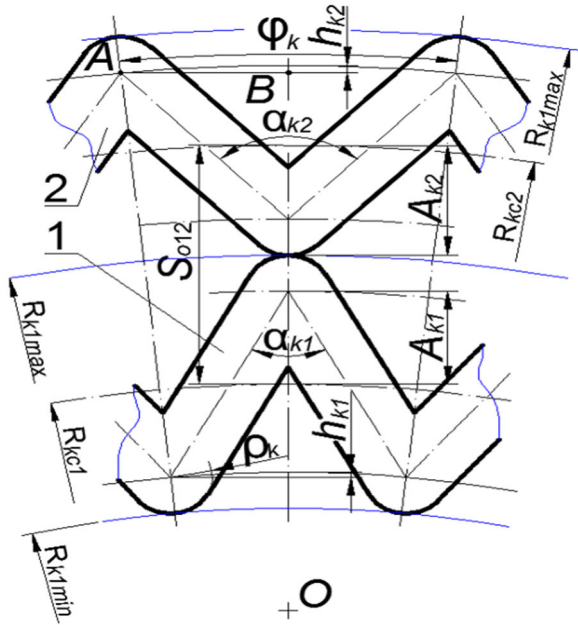


Рисунок 19. Схема для визначення параметрів частково регулярного мікрорельєфу II виду зі канавками V-подібної форми, зміщеними на 0,5 кутового кроку

$$F_{el,2} = \frac{8 \cdot \rho_k \cdot (R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot \rho_k) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2 \cdot \cos(\alpha_{k2}/2) [\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - \operatorname{tg}(\varphi_k/2)]} + \frac{\pi \cdot \rho_k^2 (180 - \alpha_{k2} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k^2 \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \right] \quad (16)$$

Умову формування ЧРМ, що сформований на торцевих поверхнях тіл обертання із забезпеченням однакової відносної площі для канавок з різною амплітудою, записано у вигляді

$$\frac{\left(\frac{8 \cdot A_{k1}}{\cos(\alpha_{k1}/2)} + \frac{\pi \cdot \rho_k (180 - \alpha_{k1} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1} + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \right] \right)}{(R_{k1max}^2 - R_{k1min}^2)} = \frac{\left(\frac{8 \cdot (R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot \rho_k) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2 \cdot \cos(\alpha_{k2}/2) [\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - \operatorname{tg}(\varphi_k/2)]} + \frac{\pi \cdot \rho_k (180 - \alpha_{k2} - 0,5\varphi_k)}{180^\circ} - \rho_k \left[\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2} + \varphi_k}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \right] \right)}{(R_{k2max}^2 - R_{k2min}^2)} \quad (17)$$

Для пошуків коренів значень використано чисельні методи, зокрема метод половинного поділу відрізка. Для досягнення потрібної точності, обчислення проводили з використанням системи комп'ютерної алгебри MathCAD.

Визначено оптимальні параметри канавок II виду ЧРМ, сформованого на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання», який передбачає дотикання канавок зі зміщенням осьових ліній симетрії на кутовий крок $\gamma_\partial = 0,5 \cdot \varphi_k$. Оскільки канавки торкаються вершинами, то має місце залежність $R_{k1max} = R_{k2min}$.

Формулу для визначення A_{k2} отримано у вигляді

$$A_{k2} = \frac{(R_{kc1} + A_{k1} + 2 \cdot \rho_k) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2) - 2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_k/2)} \quad (15)$$

Площу елемента канавки ЧРМ визначено за формулою, яку для канавки 2 записано у вигляді

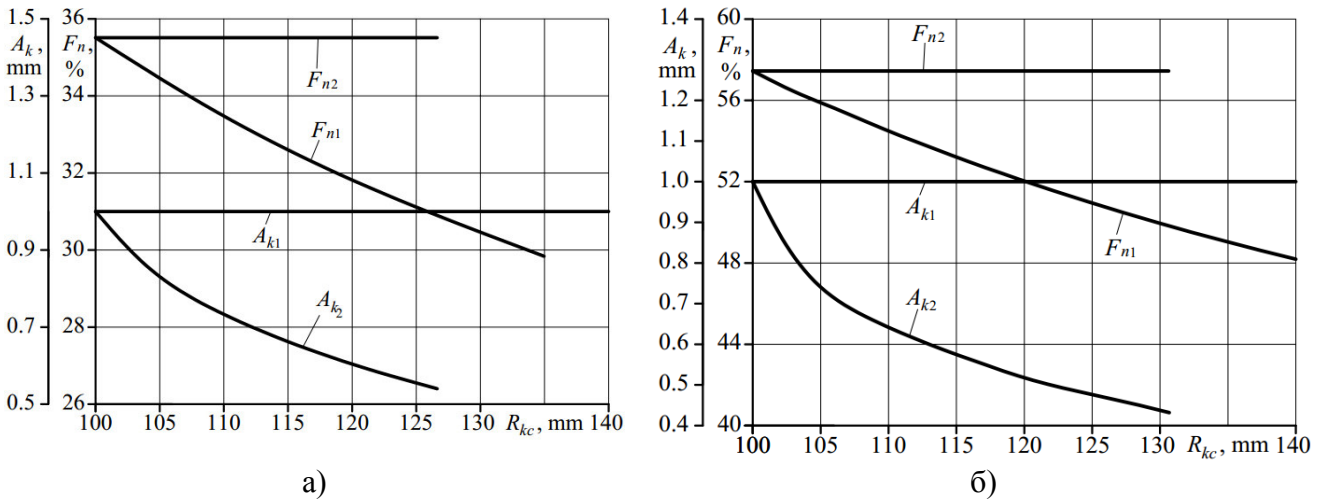


Рисунок 20. Залежність відносної площі віброобробчування F_n від амплітуди коливань A_k на різній відстані від центра обертання ТПТО за а) $\rho_k=0,25$ мм; б) $\rho_k=0,5$ мм

Встановлено, 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.

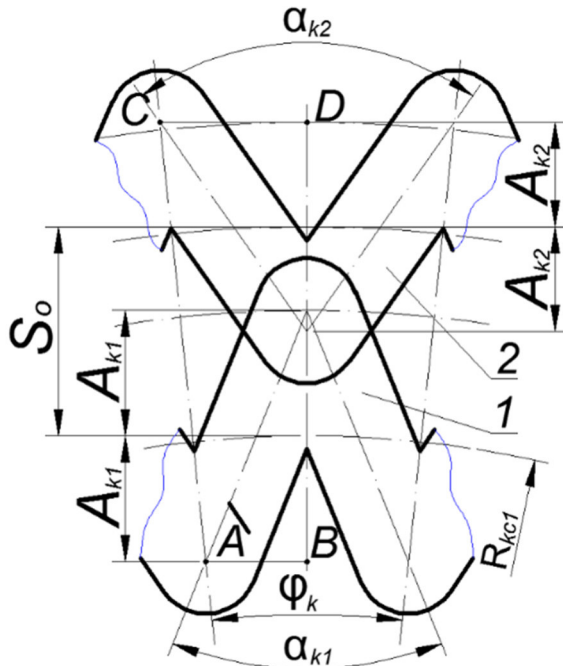


Рисунок 21. Загальний випадок перетинання канавок ЧРМ сформованих на ТПТО:

A_{k1} – амплітуда канавки 1; A_{k2} – амплітуда канавки 2; α_{k1} – кут елемента канавки 1 з радіусом R_{kc1} ; α_{k2} – кут елемента канавки 2 з радіусом R_{kc2} ; ϕ_k – кутовий крок канавок ЧРМ; ρ_k – радіус відбитка деформувального елемента

Отримано аналітичні залежності для визначення площі перекриття канавок V-подібної форми частково регулярного мікрорельєфу III виду із зміщенням на 0,5 кутового кроку, що сформований на торцевій поверхні тіла обертання на кожній із семи стадій перетину елементів канавок та діапазони їх існування. Встановлено залежність між геометричними параметрами канавок V-подібної форми та їх розміщенням. Встановлено вплив геометричних параметрів канавок і їх розміщення на площу перекриття.

Отримані аналітичні залежності забезпечать необхідну площу віброобробчування шляхом зміни осьового кроку ЧРМ у заданому діапазоні значень осьового кроку канавок мікрорельєфу. Розроблено алгоритм визначення оптимального значення осьового кроку S_0 канавок V-подібної форми для ЧРМ,

сформованого на торцевих поверхнях тіл обертання.

Таблиця 10. Аналітичні залежності для визначення площі перекриття канавок V-подібної форми ЧРМ III виду

№ з/п	Схема перетину канавок ЧРМ	Формула площі перекриття та умови її існування
Стадія I		$S_{ov} = \rho_k^2 \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot \arccos\left(\frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2 \cdot \rho_k}\right)}{180^\circ} - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{S_o - A_{k1} - A_{k2}}{2 \cdot \rho_k}\right)\right) \right];$ $A_{k1} + A_{k2} + 2 \cdot \rho_k > S_o \geq A_{k1} + A_{k2} + 2 \cdot \rho_k \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)$
Стадія II		$S_{ov} = S_{s1} + S_{s2} + S_{t1} + S_{t2}$ $S_{t1} = \frac{2\rho_k \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} + \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} \right) - 2 \cdot (S_o - A_{k1} - A_{k2})}{\operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right) + \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} - \Delta_{h1} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \cdot \Delta_{h1};$ $S_{t2} = \frac{2\rho_k \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} + \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)} \right) - 2 \cdot (S_o - A_{k1} - A_{k2})}{\operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k2}}{2}\right) + \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha_{k1}}{2}\right)} - \Delta_{h2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) \cdot \Delta_{h2}$ $S_{s1} = \frac{\rho_k^2}{2} \cdot \left[\frac{\pi \cdot (180 - \alpha_1)}{180^\circ} - \sin(180 - \alpha_1) \right];$ $S_{s2} = \frac{\rho_k^2}{2} \cdot \left[\frac{\pi \cdot (180 - \alpha_2)}{180^\circ} - \sin(180 - \alpha_2) \right].$ $2 \cdot \rho_k \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right) + A_{k1} + A_{k2} > S_o > A_{k1} + A_{k2} + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)}\right)$
Стадія III		$S_{ov} = S_{s1} + S_{s2} + S_{t1} + S_{t2} - S_{s3};$ $S_{s3} = \frac{\pi \cdot \left[A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)}\right) \right]^2}{360} \cdot \alpha_{k2}$ $A_{k1} + A_{k2} + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)}\right) > S_o > A_{k1} + A_{k2} + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)}\right)$

№ з/п	Схема перетину канавок ЧРМ	Формула площі перекриття та умови її існування
Стадія IV		$S_{ov} = S_{s1} + S_{s2} + S_{t1} + S_{t2} - S_{s3} - S_{s4};$ $S_{s4} = \frac{\pi \cdot \left[A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} \right) \right]^2}{360^\circ}$ $\begin{cases} S_o > A_{k1} + A_{k2} + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} \right) \\ S_o > A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) + \frac{2 \cdot \rho_k}{1 - \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)}} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)}{\sin[(\alpha_{k1} + \alpha_{k2})/2]} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)}{\sin(\alpha_{k1}/2)} \end{cases}$
Стадія V		$S_{ov} = S_{s2} + S_{t1} + S_{t2} - S_{BCD} - S_{s4} - 2 \cdot S_{CDE}$ $S_{BCD} = \left[A_{k1} + A_{k2} - S_o + \rho_k \left(1 - \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) - \rho_k \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) \right) \right] \cdot \rho_k \cdot \cos\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right);$ $S_{CDE} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_s/2)} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_s}{2}\right)} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{k1} - \alpha_s}{2}\right)$ $\begin{cases} S_o > A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) + \frac{2 \cdot \rho_k}{1 - \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2)}} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin[(\alpha_{k1} + \alpha_{k2})/2]} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \\ S_o < A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) + \frac{2 \cdot \rho_k}{1 - \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)}} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)}{\sin[(\alpha_{k1} + \alpha_{k2})/2]} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k2}/2)}{\sin(\alpha_{k1}/2)} \end{cases}$
Стадія VI		$S_{ov} = \frac{8 \cdot \rho_k^2}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)} \cdot \frac{\left[S_o - A_{k1} - A_{k2} + \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \right]^2}{\operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k1}}{2}\right) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha_{k2}}{2}\right)}$ $\begin{cases} S_o > A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) \\ S_o < A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right) + \frac{2 \cdot \rho_k}{1 - \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{k2}/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_{k1}/2)}} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin[(\alpha_{k1} + \alpha_{k2})/2]} \cdot \frac{\rho_k \cdot \cos(\alpha_{k1}/2)}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \end{cases}$
Стадія VII		$S_{ov} = \frac{8 \cdot \rho_k^2}{\sin\left(\frac{\alpha_{k1} + \alpha_{k2}}{2}\right)}$ $S_o < A_{k1} + A_{k2} - \rho_k \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{k1}/2)} + \frac{1}{\sin(\alpha_{k2}/2)} \right)$

У п'ятому розділі наведено результати практичної реалізації технології формування частково регулярних мікрорельєфів на торцевих поверхнях тіл обертання. Дослідження проведено на фрезерному верстаті з ЧПК ТМ-1. Для отримання координат, необхідних для побудови циклограми руху інструменту, використано математичну модель ЧРМ V-подібної форми, сформованого на торцевій поверхні деталі класу «тіла обертання» із траєкторією осьових ліній симетрії у вигляді концентричних кіл, розміщених на різній відстані від центра обертання деталі, який використовувався як точка відліку системи координат верстату.

Для формування ЧРМ використовували спеціальний інструмент, розроблений для формування мікрорельєфів із можливістю зміни зусилля деформування (рис. 22). Для формування частково регулярного мікрорельєфу використовували підшипникові кульки діаметром 6 мм.

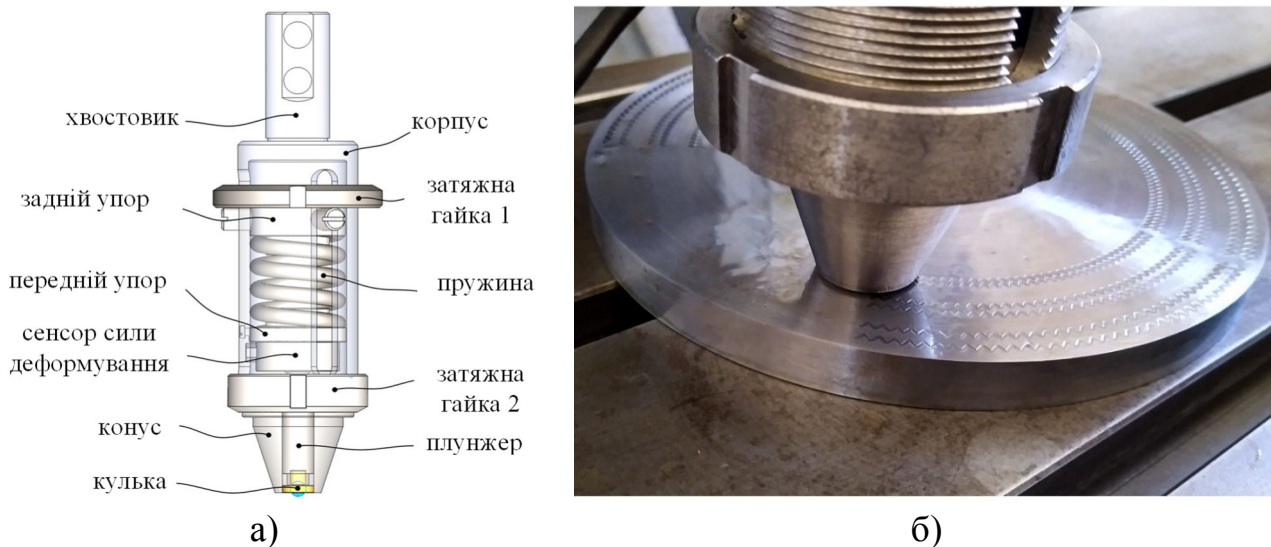


Рисунок 22. Схема інструменту та встановлення його на фрезерному 5-ти координатному верстаті для формування ЧРМ на торцевих поверхнях тіл обертання:

а) схема інструменту; б) встановлення інструменту на верстаті ТМ-1

Параметри кульок регламентуються стандартом ГОСТ 3722-2014 «Кульки підшипникові». Кульки термічно оброблені, їх твердість становить від 82,3 до 84,5 HRA. Експериментальні дослідження планували у вигляді повно факторного експерименту з одночасною зміною трьох факторів (таблиця 11). Методом експертних оцінювань обрано змінними параметрами: зусилля деформування, швидкість подачі інструменту та осьовий крок канавок. Саме ці параметри при незначній їх зміні найбільше впливають на зміну ширини сформованої канавки і, відповідно, площі частково регулярного мікрорельєфу при його формуванні на торцевих поверхнях тіл обертання. Крім цього дані параметри є взаємозалежними і легко контрольованими під час виконання операції формування частково регулярного мікрорельєфу. Вплив осьового кроку S_o на ширинку канавки b_k можливий лише за умови його достатньо малого значення, при якому канавки будуть розміщені досить близько одна до одної. Тому діапазон значень осьового кроку вибрано в межах від 2 до 4 мм з кроком через 1 мм. Геометричні параметри

каналок 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 каналок мікрорельєфу – V-подібна, матеріал заготовки – Сталь 45.

Таблиця 11. Результати вибору рівнів варіювання та кодування факторів при встановленні ширини утворених каналок b_k

Фактори	Позначення	Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натуральні		
Зусилля деформування	$F_{d,i}$, Н	200	600	400	200
Швидкість подачі	$f_{in,i}$, мм/хв	500	1500	1000	500
Відстань між осями каналок	S_o , мм	1	4	3	2

Форма і розміри дослідного зразка спроектовано таким чином, щоб максимально використати його площу. Для цього обидві поверхні зразка поділено на дев'ять секцій, щоб отримати 27 ділянок (рис 23) із мікрорельєфами, отриманими при режимах, які розраховані в програмі проведення експериментальних досліджень. Координати траєкторії руху інструменту розраховані за допомогою програми, написаної в середовищі MathCAD на основі математичних моделей, описаних у розділі 4 дисертаційної роботи.

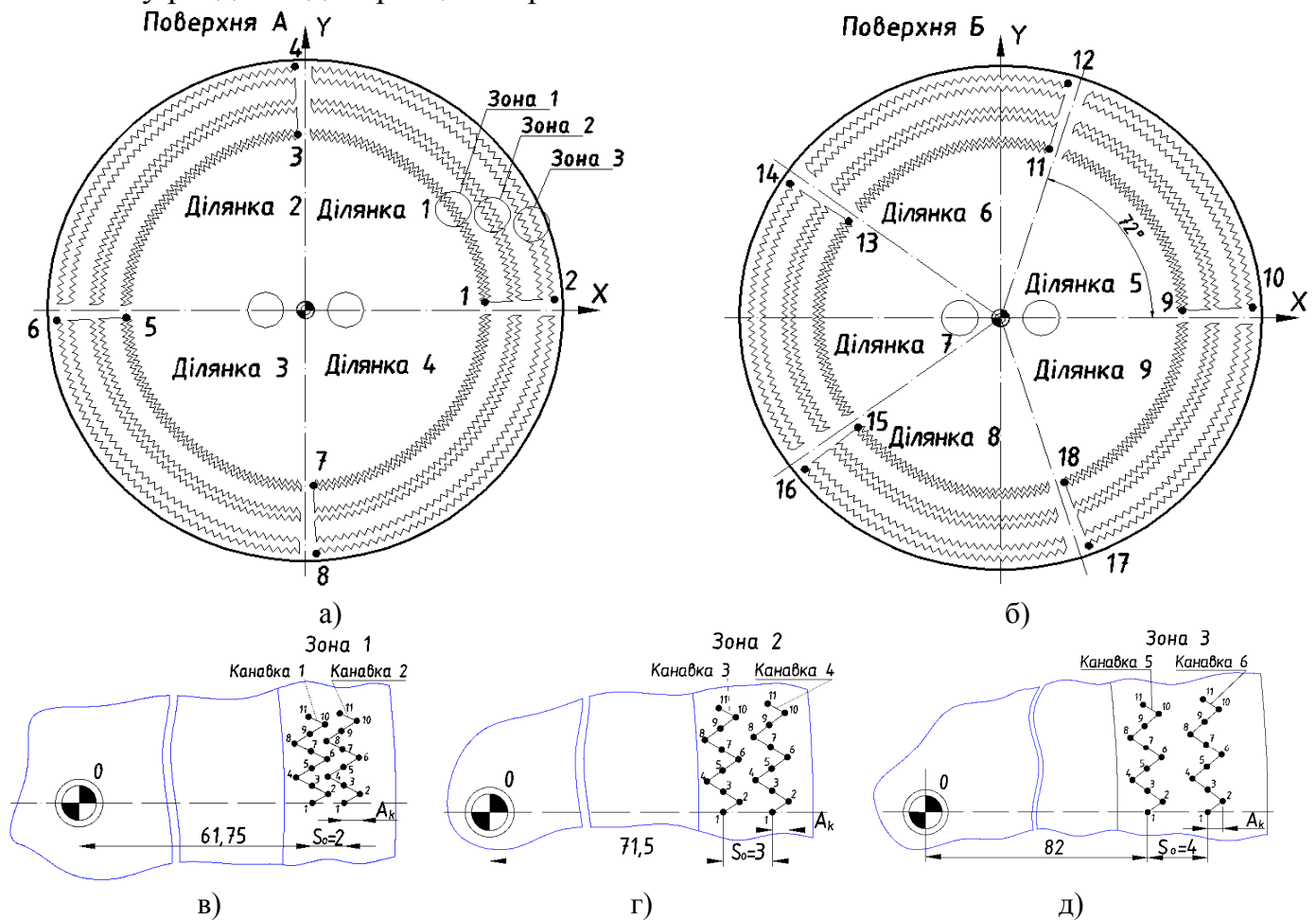


Рисунок 23. Дослідний зразок із розміткою контрольних точок руху інструменту:

1-2,..17-18 – точки початку та кінця траєкторії руху інструменту при формуванні ЧРМ;

а) поверхня А; б) поверхня Б; в) – г) зони 1–3

Значення параметра b_k отримували шляхом його вимірювання на фотографіях (рис. 24) кожної із 27 зон дослідного зразка, отриманих за допомогою обладнання Digital microscope DigiMicro Lab 5.0+.

Перед здійсненням замірів ширини сформованих канавок здійснювалось калібрування кожної фотографії за допомогою програмного забезпечення PortableCapture Pro, після чого визначались реальні розміри ширини канавок $b_{k,i,j}$.

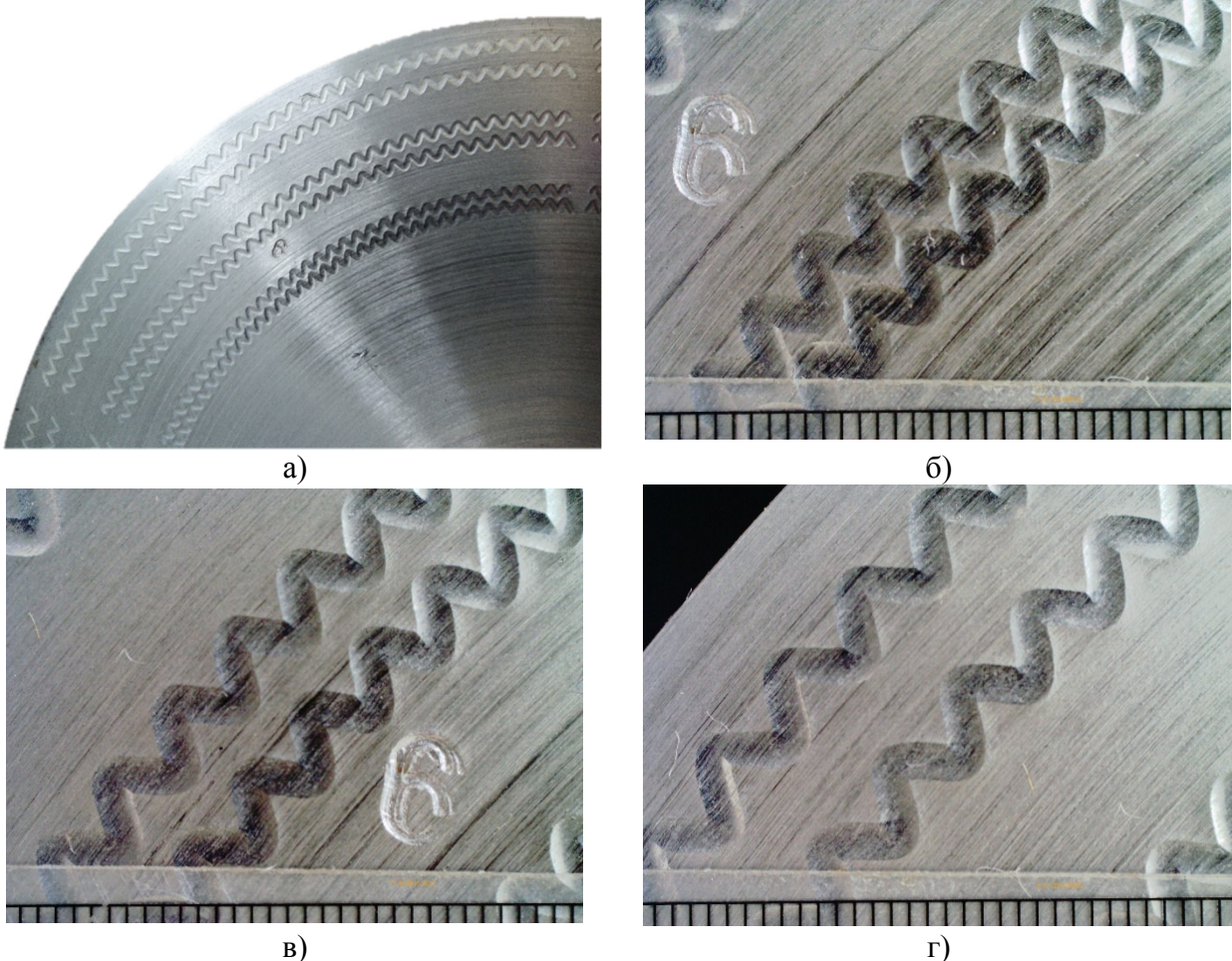


Рисунок 24. Частково регулярний мікрорельєф, сформований на торцевій поверхні тіла обертання:
а) загальний вигляд ділянки 9; б) $S_o=2$ мм; в) $S_o=3$ мм; г) $S_o=4$ мм

Для отримання достовірних результатів досліджень формували статистичні вибірки із десяти значень досліджуваного параметра – ширини канавки $b_{k,i,j}$, де i – порядковий номер дослідження ($i=1..27$), j – порядковий номер виміру значення ширини канавки ($j=1..10$). Після цього визначали математичне сподівання ширини канавки, яке використовували для побудови рівнянь регресії. Загальний вигляд рівняння регресії ширини 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 натуральних величинах після перетворення та спрощення виразів представлено у вигляді:

$$b_{(S_{o,i}, F_{d,i}, f_{in,i})} = 0,0261 + 9,5 \cdot 10^{-3} S_{o,i} + 2,6287 \cdot 10^{-3} F_{d,i} + 1,389 \cdot 10^{-4} f_{in,i} - 3,125 \cdot 10^{-5} S_{o,i} F_{d,i} - 1,95 \cdot 10^{-5} S_{o,i} f_{in,i} - 8 \cdot 10^{-8} F_{d,i} f_{in,i} + 4 \cdot 10^{-3} S_{o,i}^2 - 1,6 \cdot 10^{-6} F_{d,i}^2 - 3 \cdot 10^{-8} f_{in,i}^2. \quad (18)$$

Графічні значення результатів залежності ширини канавки, отримано з

використанням програмного забезпечення MathCAD, наведено на рис. 25 – 26.

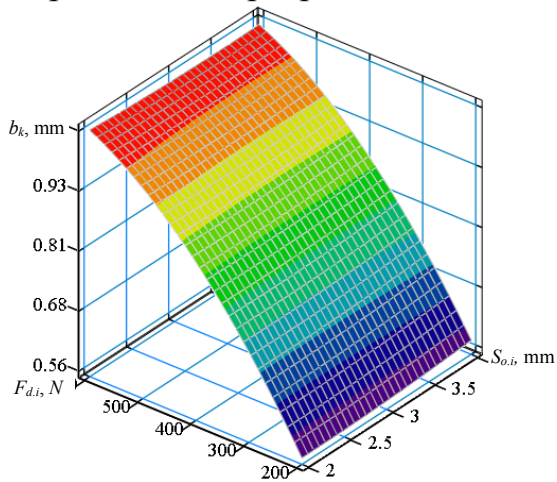


Рисунок 25. Поверхня відгуку залежності ширини канавки від зміни осьового кроку нерівностей $S_{o,i}$ та зусилля деформування $F_{d,i}$ ($f_{in,i} = 1000$ мм/хв)

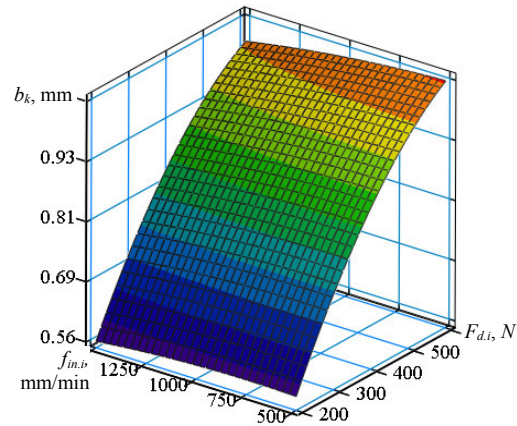


Рисунок 26. Поверхня відгуку залежності ширини канавки від зміни зусилля деформування $F_{d,i}$ та швидкості подачі $f_{in,i}$ ($S_{o,i} = 4$ мм)

Проведений аналіз залежності ширини сформованої канавки від досліджуваних факторів свідчить, що визначальний вплив здійснює зусилля деформування, зростання якого на всьому діапазоні значень експериментальних досліджень призводило до монотонного збільшення ширини сформованої канавки.

Швидкість подачі інструменту суттєво впливала 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.

Вихідна шорсткість поверхні дослідного зразка становила $Ra = 16$ мкм. Досліджено вплив режимів формування ЧРМ на величину шорсткості поверхні при рівнях варіювання змінних факторів, які наведені у таблиці 5.1. Шорсткість поверхні заміряли приладом Surface Roughness Tester - Mitutoyo, SurfTest SJ-301. Даний прилад визначає параметри шорсткості Ra та Rz .

При порівняльному аналізі використано параметр шорсткості Ra , як інформативніший. Крім цього, прилад забезпечував отримання профілограми профілю поверхні, яку можна використовувати для оцінювання її експлуатаційних властивостей за параметрами кривої Аббота-Фаєрстоуна. Деякі з отриманих профілограм наведено на рис. 27.

За результатом аналізу числових значень параметрів шорсткості Ra встановлено, що величина осьового кроку не впливає на цей параметр. Отже, в подальшому розглядали лише вплив подачі інструменту та зусилля деформування на величину параметра шорсткості. Оптимальною величиною параметра шорсткості Ra для поверхонь, які працюють у спряженні є $0,63 - 1,0$ 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.

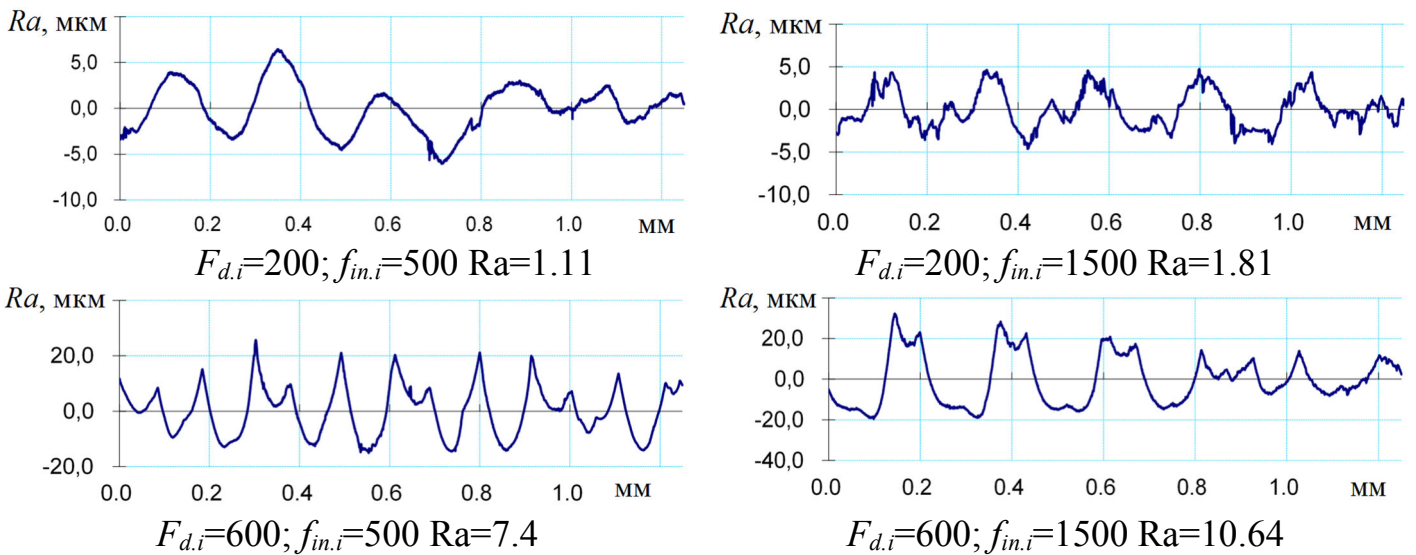


Рисунок 27. Профілограми торцевої поверхні деталі класу «тіла обертання» із сформованим мікрорельєфом

Збільшення зусилля деформування від 200 до 600 Н спричиняє зростання параметра шорсткості поверхні Ra від 1,1 до 10,6 мкм (рис. 27). Збільшення ж подачі інструменту від 500 до 1500 мм/хв також збільшує шорсткість поверхні від 1,1 до 1,81 мкм. Однак це зростання є не таким стрімким і, в окремих випадках, може розглядатись як спосіб суттєвого підвищення продуктивності праці на операції формування частково регулярних мікрорельєфів.

Тому оптимальною структурою технологічних операцій для торцевих поверхонь тіл обертання є токарна обробка (чорнова/напівчистова та чистова) із забезпеченням висотного параметра шорсткості $Ra=2,5$ мкм, з подальшим гартуванням і чистовим шліфуванням до $Ra=1,25$ мкм та формуванням частково регулярного мікрорельєфу. При цьому шорсткість поверхні із частково регулярним мікрорельєфом зменшиться до $Ra=1,0$ мкм.

У шостому розділі наведено результати проектування інструменту для обробки різанням внутрішніх циліндричних поверхонь – адаптивної розточувальної головки із плаваючим інструментальним блоком. Саме на операціях обробки різанням забезпечується макрогеометричний параметр якості поверхні – точність форми поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь. Розроблено конструкцію інструменту та методику розрахунку його конструктивних параметрів в залежності від діаметра оброблюваного отвору. Визначено величину допустимих коливань плаваючого інструментального блоку залежно від якості точності оброблюваного отвору.

Розроблено конструкцію інструменту для формування регулярних мікрорельєфів вібраційним обкочуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях тіл обертання. Інструмент забезпечує можливість зміни зусилля деформування залежно від геометричних параметрів мікрорельєфу. Розроблено методику розрахунку конструктивних параметрів інструменту, яка дозволяє визначити його основні конструктивні розміри, залежно від діаметра циліндричної поверхні, на якій необхідно сформувати регулярний мікрорельєф.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

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-Фаерстоуна, 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 стабільність 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 $F_{d,i}=200\text{H}$; $f_{in,i}=500$ 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 дворізцевої 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 – дворізцева адаптивна розточувальна головка та «ОСП Корпорація ВАТРА» – метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні, сформованої точінням.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ 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, DOI: 10.1115/MSEC2014-3946 (**Scopus**). (автором запропоновано методику 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, P. 1170–1175 (**Scopus Q2**). (автором визначено точність форми поперечних перерізів гільз 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 запропоновано методику визначення впливу стохастичності подачі та проведено експериментальні дослідження).
4. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Dykha A., Zamota T., & Dzyura V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, Vol. 99, 3(12), P. 6-16. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.171619 (**Scopus Q2**). (автором проведено моделювання процесу у віртуальному середовищі).
5. Dzyura, V., Kryvyi P., Maruschak P., Panin S., Lyashuk O., Vlasov I. Influence of curvature and cross-sectional shape of cylindrical surface formed by turning on its roughness. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, Vol. 45, P. 5615-5622,

DOI: 10.1007/s13369-020-04512-8 (**Scopus Q2**). (автором запропоновано методику та проведено 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, DOI: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, DOI:10.3390/met10070852 (**Scopus Q2**). (автором запропоновано вплив середовища на висотні параметри шорсткості циліндричної поверхні).

8. 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*, 2021, Vol. 5(1), P. 18-29, DOI: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. DOI: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, DOI:10.3390/machines9060116 (**Scopus Q2**). (автором досліджено параметри якості поверхні та встановлено їх взаємозв'язок із експлуатаційними властивостями).

11. Дзюра В.О., Палюх А.Я. Динамічна модель процесу проточування зовнішніх гвинтових канавок. 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. Ткачук А.А., Заблоцький 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. (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 дворізцева 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. // 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. Центральнуукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2020. Вип. 3(34). С. 129–135. (Фахове видання України).

18. Марущак П.О., Литвиненко Я.В., Дзюра В.О., Біщак Р.Т., Полутренко М.С. Виявлення мікроефектів на поверхні кородованої сталеві труби. Фізико-хімічна механіка матеріалів, 2020. №3. С. 103–111. (Фахове видання України). (автором проаналізовано поверхневі мікроефекти циліндричних поверхонь).

19. Dzyura V. Modeling of partially regular microreliefs formed on the end faces of rotation bodies by a vibration method. UJMEMS, 2020, Vol. 6, № 1, P. 30–38. (Фахове видання України).

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

21. 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.

22. Кривий П., Дзюра В., Тимошенко Н. Прогресивна технологія формування регулярних мікрорельєфів на довгомірних циліндричних поверхнях. Дванадцятий Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. С. 85–86.

23. 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.

24. 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.

25. Дзюра В.О., Кривий П.Д. Обґрунтування конструктивних параметрів інструменту 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.

26. 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.

27. Кривий П.Д., Крупа В.В., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М. Ймовірно-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.

28. 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.

29. 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*).

30. 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, G01В 21/30, G01В 7/34, В23В 25/06; заявлено 02.04.2015, опубліковано 10.08.2016, Бюл. № 15 (*частка всіх авторів однакова*).

31. Дзюра В.О. Спосіб визначення впливу кривизни на шорсткість обробленої поверхні. Деклараційний патент на корисну модель № 111018 G01В 21/30; заявлено 28.04.2016, опубліковано 25.10.2016, бюл. № 20.

32. Дзюра В.О., Кривий П.Д. Дворіздева адаптивна розточувальна головка. Патент на винахід № 114667 В23В 29/03; заявлено 16.10.2015, опубліковано 10.07.2017, Бюл. № 13 (*частка всіх авторів однакова*).

33. Дзюра В.О. Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням. Деклараційний патент на корисну модель № 121381 В24В 39/00; заявлено 13.03.2017, опубліковано 11.12.2017, Бюл. № 23.

34. 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*).

35. 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.

36. Марушак 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*).

37. Марушак 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 одинакова).

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

39. 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*).

40. 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*).

АНОТАЦІЯ

Дзюра В.О. Наукові основи забезпечення параметрів якості робочих поверхонь тіл обертання технологічними методами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – Технологія машинобудування. – Національний університет «Львівська Політехніка», Львів, 2021.

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати вирішення актуальної для технології машинобудування науково-прикладної проблеми 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 та забезпеченні прогресивних режимів обробки. При цьому параметри якості поверхонь, які забезпечують їх експлуатаційні властивості, запропоновано забезпечувати недорогою операцією ППД із формуванням регулярних мікрорельєфів, що дозволить усунути зі структури ТП вартісні фінішні технологічні операції. Запропоновано метод визначення впливу технологічної спадковості на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь отриманих на операціях технологічного процесу, а також метод імовірнісного оцінювання впливу подачі на мікрогеометрію поверхні, сформованої точінням. Встановлено основні закономірності впливу форм та розмірів циліндричних поверхонь на параметр шорсткості. Розроблено нову математичну модель динамічного процесу формування регулярного мікрорельєфу шляхом віброобробкування на внутрішній циліндричній поверхні з урахуванням силових характеристик процесу та кінематику руху деформуючого інструменту. Використовуючи блочний підхід, отримано множину варіантів нових математичних моделей та розроблено класифікацію частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання», які враховують їх геометричні характеристики. Розроблено спосіб формування частково регулярного мікрорельєфу на торцевих поверхнях деталей класу «тіла обертання», який забезпечує його однакову відносну площу на різній відстані від центра обертання та запропоновано аналітичні залежності визначення амплітуди канавок V-подібної форми для мікрорельєфів I і II виду.

Запропоновано конструкції інструментів для обробки різанням внутрішніх

циліндричних поверхонь та формування регулярних мікрорельєфів. Розроблено програмне забезпечення для побудови математичної моделі профілю шорсткості поверхні на основі параметрів профілограми. Матеріали досліджень, методики розрахунків передані для використання машинобудівними підприємствами.

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 . – Manuscript.

Thesis for doctor degree in technical sciences by speciality 05.02.08 - technology engineering. - National University "Lviv Polytechnic", Lviv, 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 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 procedure of conducting the study of high-quality parameters formation of bodies-of-rotation-type machine parts cylindrical surfaces has been described. For this purpose the technological heredity and the shape accuracy of cylindrical surfaces cross sections of the object of investigation has been taken into consideration. The analysis and optimization of the technological process of internal cylindrical 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.

The investigation has been carried out and some mathematical model of dynamic process of regular microrelief formation on the machine part internal cylindrical 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 var-

ies 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.

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. 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.

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. 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.

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.

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.

Підписано до друку 11.08.2021. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно-друк. арк. 1,8. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 280121

Друк ФОП Паляниця В.А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528–777.