

В.О. Дзюра, П.О. Марущак

**ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ОБЕРТАННЯ
ТА ЇХ ПРОФІЛОМЕТРИЧНИЙ КОНТРОЛЬ**

Монографія

**Тернопіль
2021**

УДК 621.01

Рецензенти:

Гурей І.В. – д.т.н., професор, професор кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, інституту механічної інженерії та транспорту Національного університету «Львівська політехніка»;

Аулін В.В. – д.т.н., професор, професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету.

*Рекомендовано до друку Вченою Радою
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя
протокол № 11 від 19 жовтня 2021 р.*

Г 27 Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль / В.О. Дзюра, П.О. Марущак. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. – 170 с.

ISBN 978-617-7875-23-8

Монографія присвячена вирішенню важливої науково-технічній проблеми, яка полягає в комплексному забезпеченні параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» з урахуванням умов експлуатації шляхом оптимізації структури технологічних процесів за параметрами якості та забезпеченні прогресивних режимів обробки з допомогою статистичних методів оцінювання.

В монографії наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень, які представлені у різних форматах, для кращого сприйняття науково-технічними працівниками, котрі займаються вирішенням даних проблемних питань.

Монографія розрахована на інженерно-технічних працівників, викладачів, науковців, аспірантів та студентів відповідних спеціальностей.

© В.О. Дзюра, П.О. Марущак, 2021
© Тернопіль, ФОП Паляниця В. А., 2021

V.O. Dzyura, P.O. Maruschak

**TECHNOLOGICAL METHODS FOR ENSURING QUALITY
PARAMETERS OF ROTARY BODIES' SURFACES AND THEIR
PROFILOMETRIC CONTROL**

Monograph

**Ternopil
2021**

Technological methods for ensuring quality parameters of rotary bodies' surfaces and their profilometric control / V.O. Dzyura, P.O. Maruschak. – Ternopil: PE Palianytsia V. A., 2021. – 170 p.

ISBN 978-617-7875-23-8

The monograph focuses on solving an important scientific and technical problem, which consists in a comprehensive provision for the quality parameters of working surfaces of parts that belong to the “rotary body” class. Operating conditions are taken into account by optimizing the technological processes' structure based on quality parameters and ensuring the advanced processing conditions using statistical evaluation methods. The monograph presents the results of theoretical and experimental research, which are presented in different formats for better perception by scientists and technicians who deal with these problems.

The monograph is intended for engineers, teachers, scientists, graduate students and students of relevant specialties.

© V.O. Dzyura, P.O. Maruschak, 2021
© Ternopil, PE Palianytsia V. A., 2021

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

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

φ_k	кутовий крок елемента частково регулярного мікрорельєфу, град.;
σ_T	границя текучості;;
σ_B	границя тимчасового опору
δ_5	відносне видовження після розриву, %
ψ	відносне звуження після розриву, %
ES	верхнє граничне відхилення, мм;
EI	нижнє граничне відхилення, мм.
D_v	обертний рух диска
D_s	рух подачі інструменту
D_i	осциляційний зворотньо-поступальний рух інструменту
$\Delta_{важ}$	допустимий зазор розточної головки, мм;
$l_{важ}$	відстань від осі обертання рівноплечого важеля, мм;
$\alpha_{важ}$	кут повороту рівноплечого важеля, град;
$R_{важ}$	відстань від осі обертання рівноплечого важеля до центра радіуса вершини різця, мм;
$a_{дон}$	допуск на оброблюваний розмір, мм;
$r_{гв}$	радіус основи упорного гвинта, мм.
НВ	твердість
ВЦП	внутрішня циліндрична поверхня
ВЦП	внутрішня циліндрична поверхня

ВСТУП

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

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

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

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

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

Параметри якості робочих поверхонь деталей машин досліджували

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

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

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

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

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

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

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ КЛАСУ «ТІЛА ОБЕРТАННЯ»

1.1 Аналіз об'єктів дослідження та технічних вимог до них

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

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

Передові закордонні компанії пішли іншим шляхом: вони максимально використовують покупні комплектуючі, виготовлені спеціалізованими підприємствами, які досягли досконалості своїх виробів. Одні виробники

хонінгують, розвертають або розкатують труби, отримуючи високий рівень чистоти внутрішньої поверхні, інші - обробляють і хромують штоки, забезпечуючи їм необхідну твердість і опір агресивним зовнішнім впливам.

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

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

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

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



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

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика [28]

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

Технічні вимоги до виготовлення гідроциліндрів:

Точність внутрішнього діаметра гільзи по 5, 6 квалітету.

Овальність конусність в межах 0,01мм;

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

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

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

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

Таблиця 1.2 – Номенклатура гідроциліндрів виробництва “ДЗАК”

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

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

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

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

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

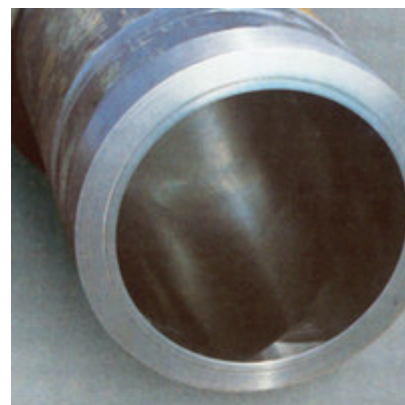


Рисунок 1.2 – Фотографії заготовок гідроциліндрів

Таблиця 1.3 – Хімічний склад матеріалів заготовок гідроциліндрів

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

Продовження таблиці 1.3

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

Таблиця 1.4 – Механічні властивості матеріалів заготовок гідроциліндрів

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Характеристика механічних властивостей матеріалу 30ХГС:

- границя міцності σ_B – 7000 МПа;

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

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

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

Токарна. Обробка зовнішніх поверхонь деталі, підрізка торців.

Термічна. Гартування поверхні для нарізання шліців.

Протяжна. Нарізання шліців на внутрішній поверхні шківів.

Токарна. Розточування внутрішніх технологічних канавок.

Токарна. Обточування зовнішньої робочої поверхні диска.

Кругло-шліфувальна. Шліфувати робочі поверхні конуса в розмір.

Шліце-шліфувальна. Шліфування робочих поверхонь шліців.

Контрольна. Контроль відповідальних поверхонь.

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

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

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

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

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

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

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

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

осередком руйнування деталі в процесі експлуатації.

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

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

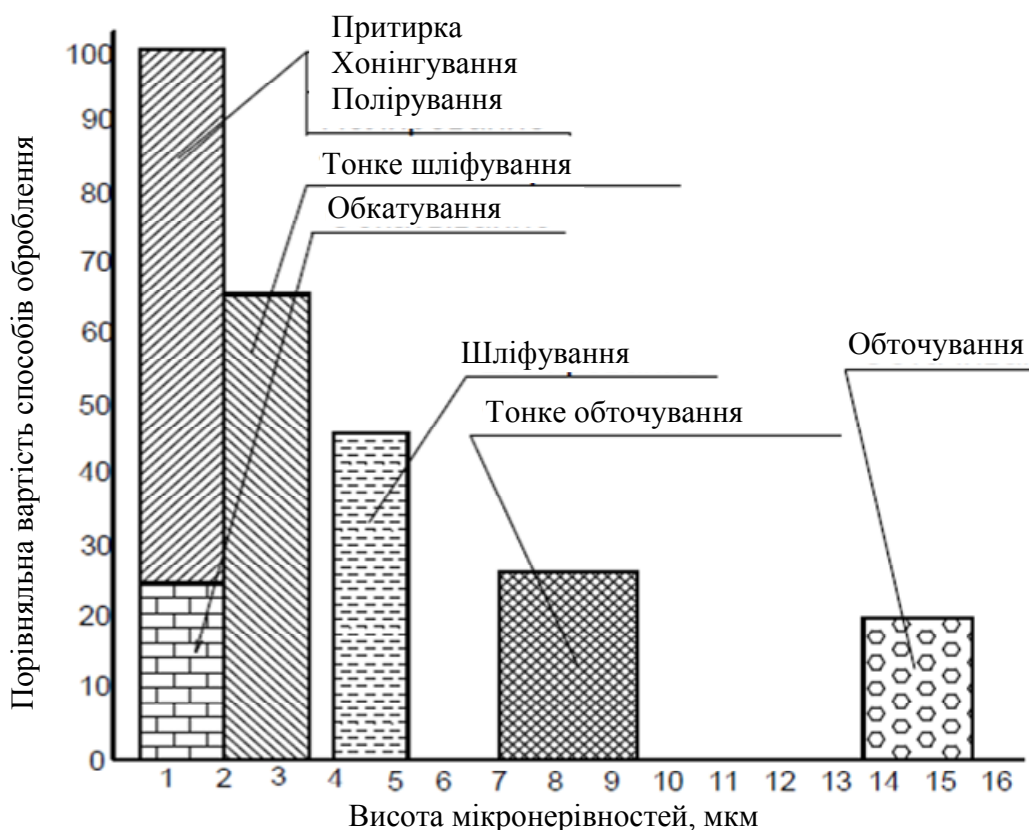


Рисунок 1.4 – Порівняльна діаграма різних методів чистової обробки і досягнутої при цьому шорсткості поверхні (по даних фірми «Hegenschiede») [22]

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

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

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

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

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

Способи зміцнюючої обробки детально розглянуті в роботах [57, 84, 88, 151, 185, 191, 238, 242, 246, 261, 269]. В роботах Личковаха А.С. [192] наведено

класифікацію способів поверхневого пластичного деформування внутрішніх циліндричних поверхонь (рис. 1.5).

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

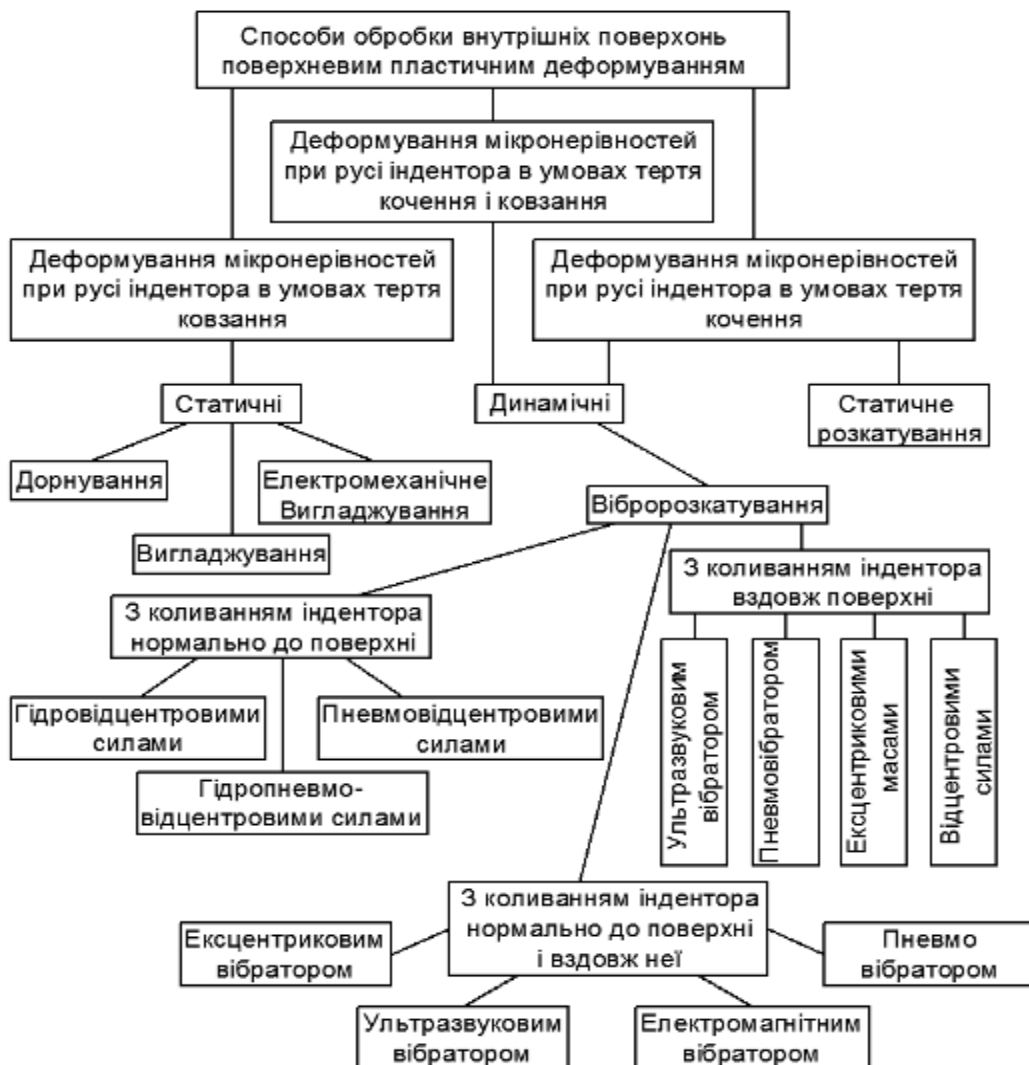


Рисунок 1.5 – Класифікація способів поверхневого пластичного деформування внутрішніх циліндричних поверхонь [192]

Значною перевагою вібронакатування є значне скорочення часу

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

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

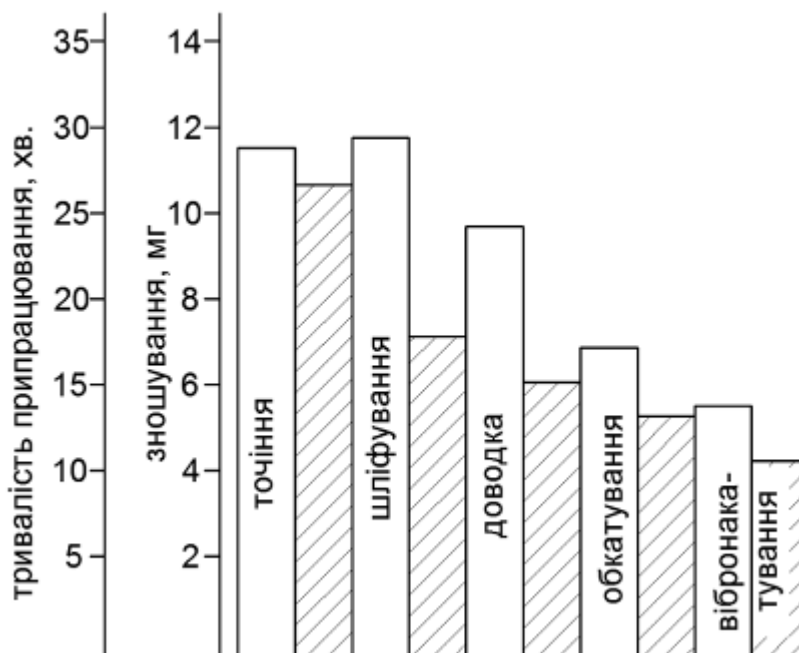


Рисунок 1.6 – Залежність часу припрацювання і величини зношування від способу обробки поверхонь [269]

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

В роботі [185] описано переваги обробки методами ППД поверхонь із сталі 45, сталі 20ХС та сталі 35. Встановлено, що ступінь наклепу при використанні вібраційно-відцентровго методу обробки становить: для сталі 35 –

52 %; для сталі 45 – 40 %, для сталі 20ХС – 24 %, проте час оброблення сталі 35 значно більший від часу оброблення інших матеріалів.

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

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

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

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

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

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

1.3 Аналіз результатів досліджень забезпечення параметрів якості поверхонь деталей машин

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

Нормування відхилень від круглості регламентовано відповідними стандартами, наприклад ГОСТ 24642-81, і полягає в обмеженні їх допусками

[101]. Відхилення від круглості [101, 107] визначаються як максимальні відхилення реальних профілів від вписаного у круглограму кола для внутрішніх циліндричних поверхонь і описаного кола навколо кругло грами – для зовнішніх циліндричних поверхонь.

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

Ще одним критерієм якості циліндричної поверхні є хвилястість. Цей параметрів як проміжна ланка між макрогеометричними та мікрогеометричними параметрами поверхні. Критерієм для визначення хвилястості є величина відношення кроку до висоти нерівностей (рис.1.7). Для шорсткості це відношення орієнтовно рівне $l/H < 50$, для хвилястості – $L/H_b = 50 - 1000$, для макрогеометрії – $L/H_b > 1000$ [251].

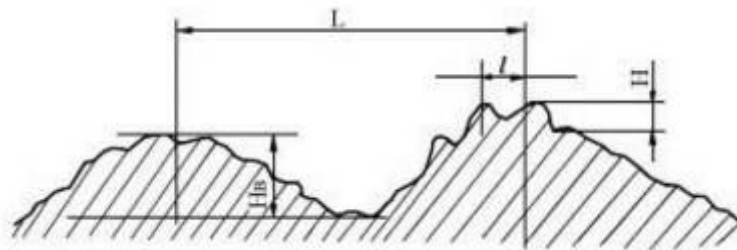


Рисунок 1.7 – Визначення хвилястості поверхні

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

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

Експериментами [120] також встановлено, що для кожних конкретних

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

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

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

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

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

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

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

точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь.

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

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

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

Так у одній із першій наукових праць [156] присвяченій дослідженню

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

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

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

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

Аналіз емпіричних формул для визначення параметра шорсткості, які

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

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

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

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

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

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

Здійснений аналіз вищеподаних літературних джерел показав, що на даний час існує два погляди про характер впливу s на R_a : за одним ця залежність монотонно зростаюча, за іншим – збільшення подачі від малих

значень подач ($s > 0,02$ мм/об) спричиняє зменшення шорсткості до певного мінімального значення, а подальше збільшення s – до її зростання.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Найбільш перспективним методом усунення неспіввісності осей інструменту та заготовки при обробленні отворів є використання самовстановлювальних інструментів, з яких найбільш технологічними є плаваючі дволезові блоки [100].

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

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

обробки внутрішніх циліндричних поверхонь при їх обробленні.

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

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

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

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

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

де R_{z0} – початкова висота нерівностей; K_M – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу; λ – коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу; F - площа контакту, яка розраховується за формулою:

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

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

В розрахунковій формулі, запропонованій Браславским В.М. [95, 96] величина

R_z пов'язана з величиною подачі і розмірами де формувального елемента:

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

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

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

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

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

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

Однак про відносність параметра шорсткості для оцінки якості поверхні можна зробити висновок проаналізувавши рисунок 1.8.

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

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

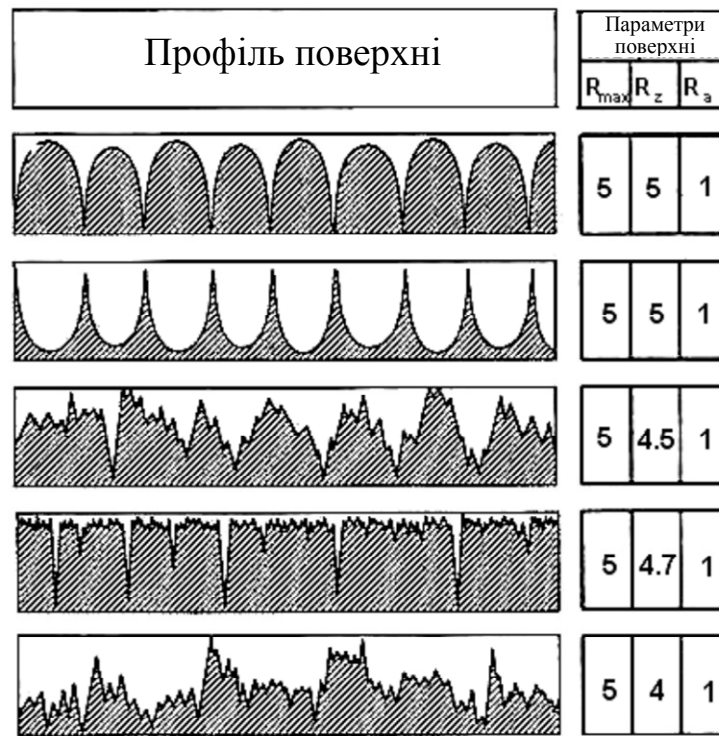


Рисунок 1.8 – Різні профілі поверхні з однаковим значенням параметра R_a [253].

Взаємозв'язок між експлуатаційними властивостями поверхні і параметрами шорсткості описаний в роботі [26], де оцінку експлуатаційних властивостей поверхні проводять не за шорсткістю поверхні, а за допомогою параметрів кривої Аббота–Ферстоуна. Автори стверджують найважливіше значення мають три параметри цієї кривої, за якими можна оцінити експлуатаційні властивості поверхні, зокрема її опір зношуванню, це R_{pk} , R_k і R_{vk} .

Особливості оцінки стану поверхні за допомогою параметрів кривої Аббота–Ферстоуна описано також в роботі [38]. Встановлено, що функціональні властивості поверхні є у залежності від її фактичного стану, який залежить не лише від шорсткості поверхні, а і від її фізико-механічних її властивостей. Тож встановлено наявність технологічних та геометричних параметрів, вплив яких на параметри якості поверхні може бути суттєвим. До таких параметрів належать форма та діаметр поверхні деталі класу «тіла обертання», стохастичність подачі верстату та інші. Розроблення методів врахування цього впливу та визначення ступеня цього впливу є актуальною задачею для машинобудівного виробництва.

РОЗДІЛ 2

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

2.1 Технологічна спадковість і точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь гідроциліндрів

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

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

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

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

Таке подання точності форми з точки зору інформативності є недостатнім

і не може бути використано для виявлення і аналізу причини, які впливають на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь.

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

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

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

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

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

періодичною функцією.

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

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

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

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

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

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

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

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

При цьому проміжок $[a, b]$ зміни значень величини Δ вважається відомим

і також врахувавши закон розподілу Релея [4, 31], що $a=0$ $b=\Delta_{\max}$ (Δ_{\max} - найбільше значення серед Δ_i ($i=1, n$) експериментальних даних випадкової величини Δ).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Застосувавши такий підхід для i дослідів отримаємо

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

або

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

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

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

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

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

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

ексцентриситету [157].

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

Якщо $k_0 = 1$ отримаємо

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

Звідки

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

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

Обчисливши інтеграли

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

Отримаємо

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Дисперсія $D(\Delta)$ визначається за формулою

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

Із врахування формули (2.4) маємо

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

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

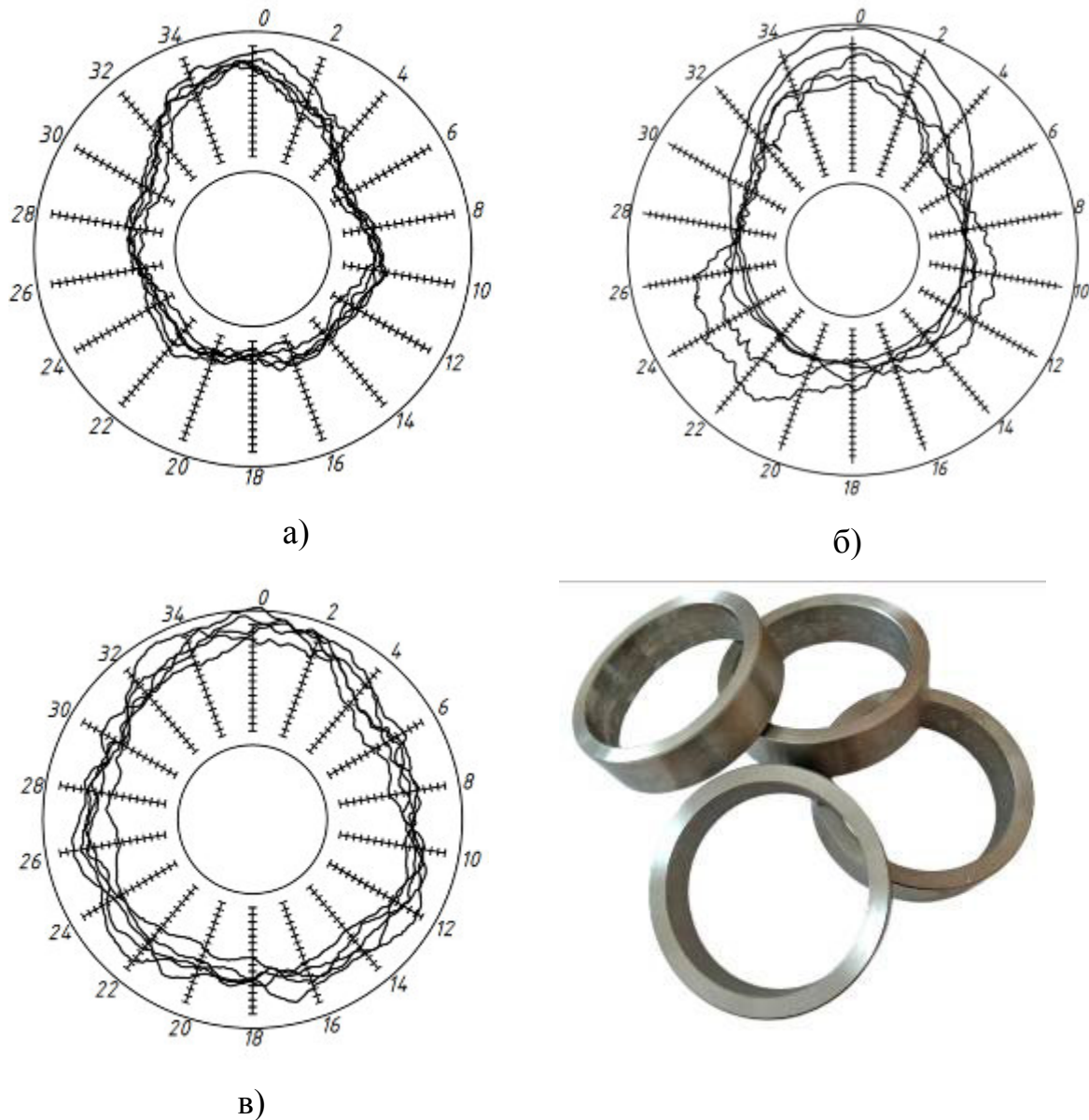
визначення дисперсії $D(\Delta)$ такого вигляду

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

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

Знайшовши в кожному із 36 положень відхилення від круглості Δ_i (результати наведені у додатку 3) як різницю віддалі від точки реального профілю до вписаного у круглограму кола і апроксимувавши отримані дані

тригонометричним рядом Фур'є (2.1). Програму для апроксимації тригонометричним рядом Фур'є наведено у додатку 4.



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

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

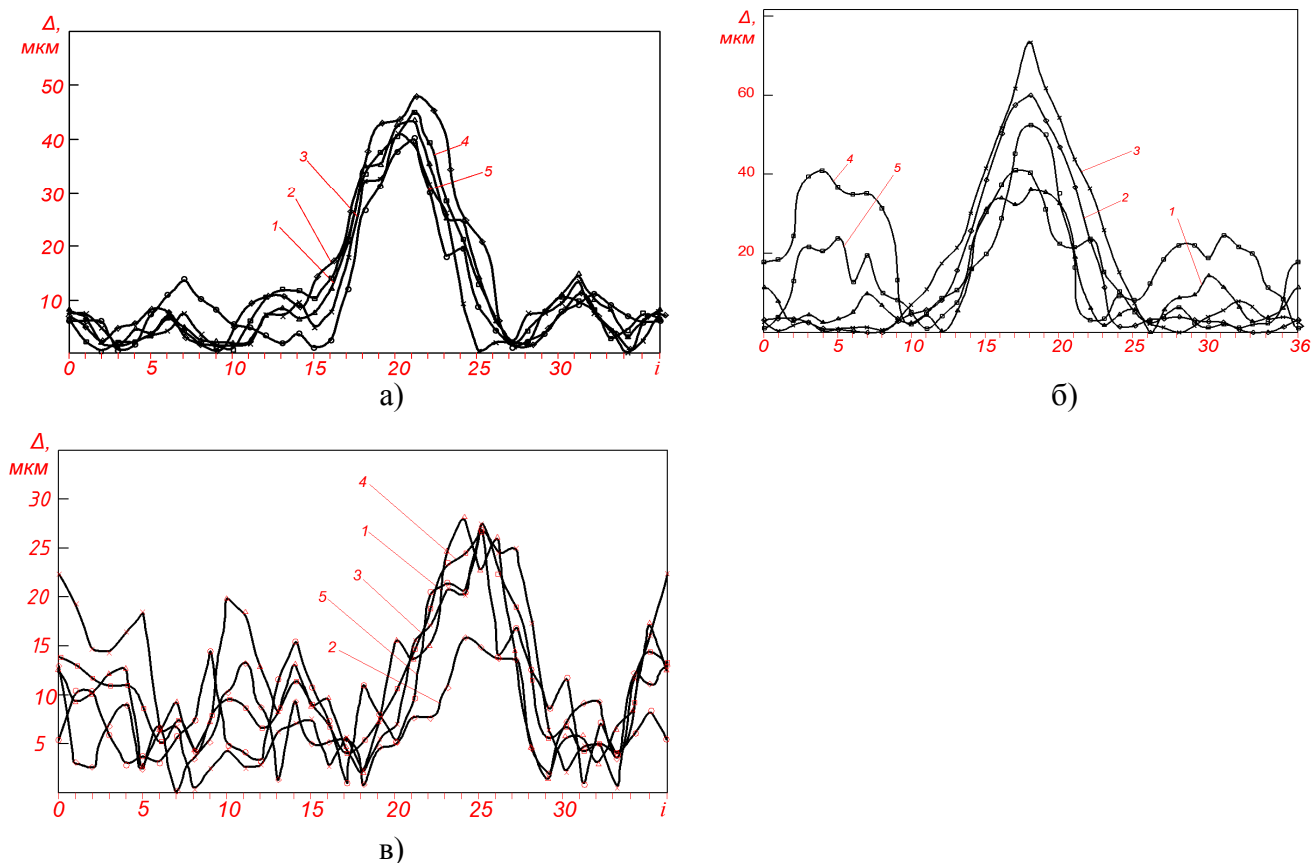


Рисунок 2.3 – Ансамбль із 5 реалізацій відхилення від круглості ВЦП гільзи гідроциліндра після чорнової обробки

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

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

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

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

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

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

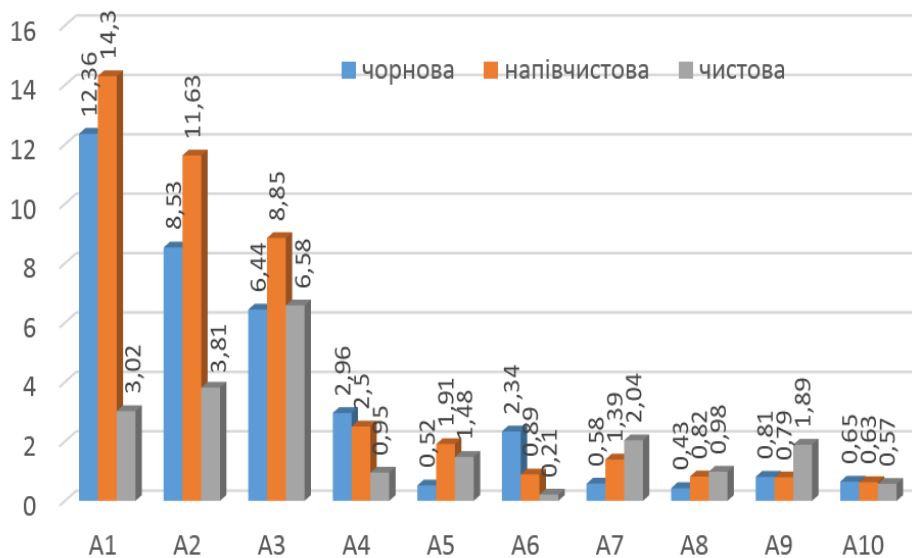


Рисунок 2.6 – Розподіл амплітуд гармонік при аналізі точності отворів гільз гідроциліндрів

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

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

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

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

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

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

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

А за двома дисперсіями за критерієм Стюдента:

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

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

Таблиця 2.4 – Значення параметрів ефективності технологічних операцій

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

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

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

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

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

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

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

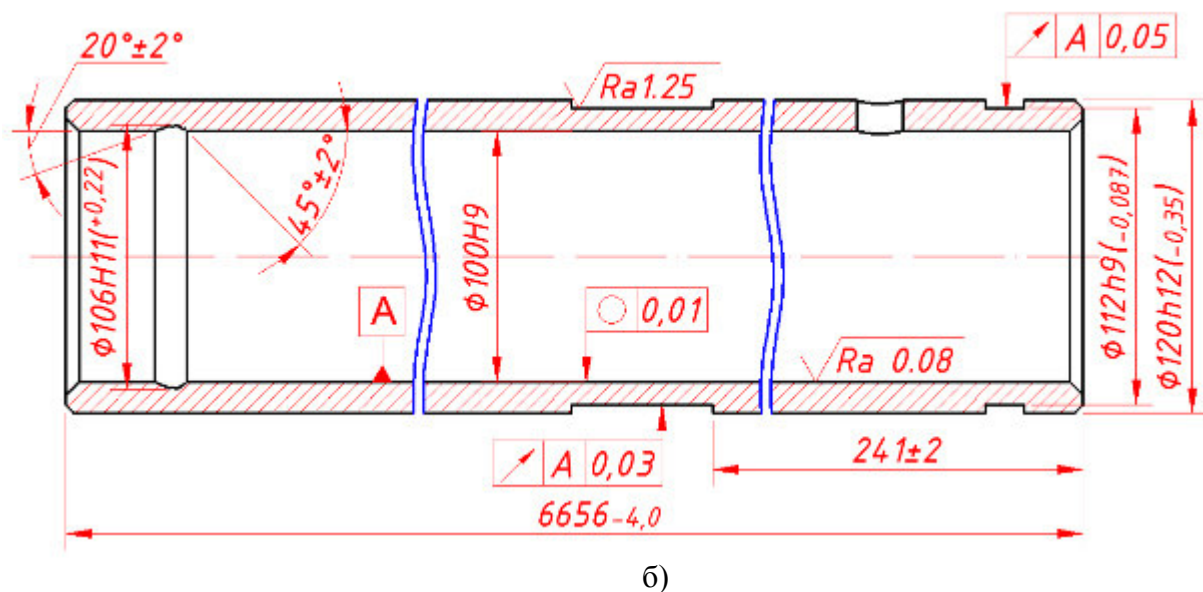
Слід зазначити, що важкі умови експлуатації, агресивне середовище, знакозмінні навантаження високої амплітуди спричиняють спотворення початкового мікрорельєфу робочої поверхні гільзи, що погіршує її експлуатаційні властивості навіть за рівномірного зношення. Проте, гільзам гідроциліндрів, за експлуатаційних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

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

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

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

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



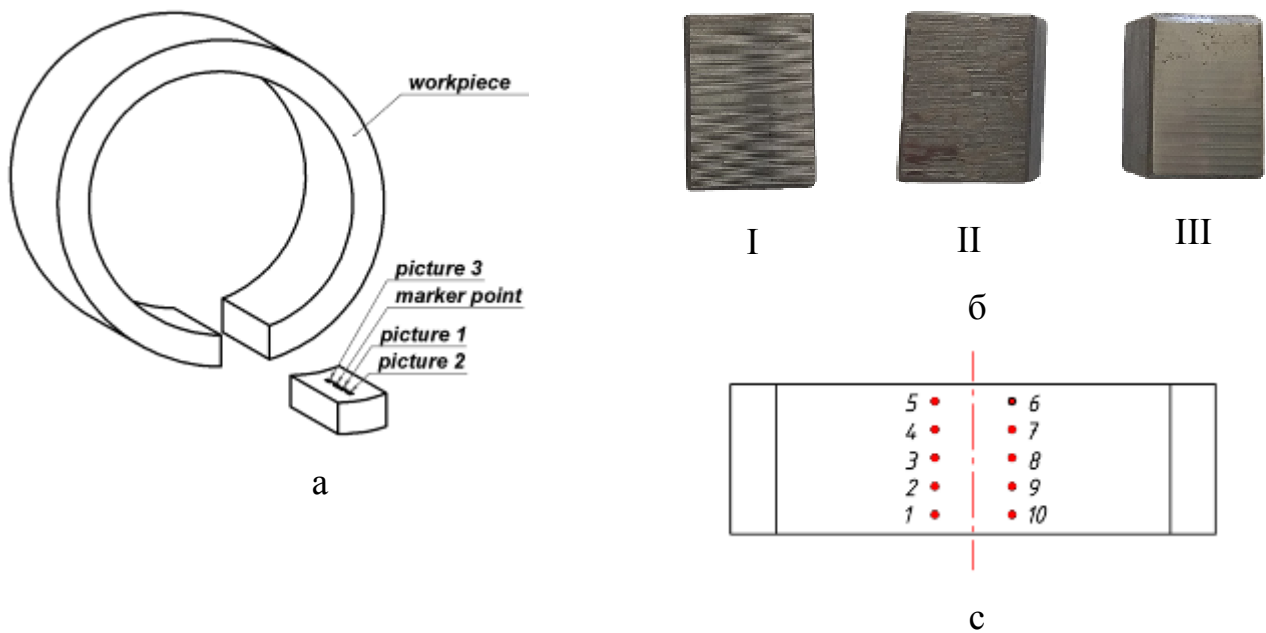
б)
Рисунок 2.7 – Деякі технічні вимоги до гільзи циліндра гідроциліндра плунжерного КС-4574.63.900-03.00 телескопування стріли автомобільного крана виробництва “ДЗАК”

Геометричні параметри гідроциліндра представлені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Загальна характеристика гідроциліндра телескопування стріли автомобільного крана

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

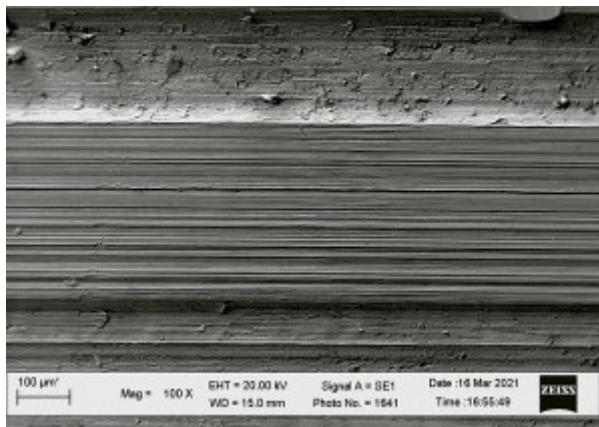
Чорнове точіння, рис. 2.9 а, б – зумовлює формування на поверхні глибоких рисок, які можна розглядати як наслідок переривчастого різання. Нерівномірність рельєфу аналізованої поверхні є негативним фактором, зумовленим вібрацією оброблюваного інструменту, оброблюваної деталі і вузлів верстату, які є причиною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

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

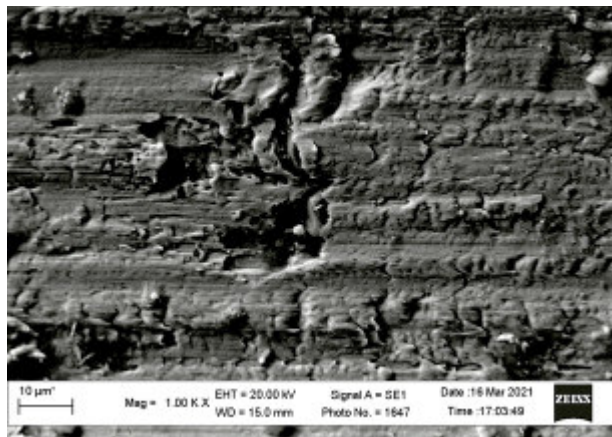
Такий механізм формування поверхні також є свідченням циклічності взаємодії інструменту та поверхні деталі. Пластичне деформування поверхневого шару, спричиняє його зміцнення та структурно-механічну неоднорідність властивостей поверхні на мікрорівні.

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

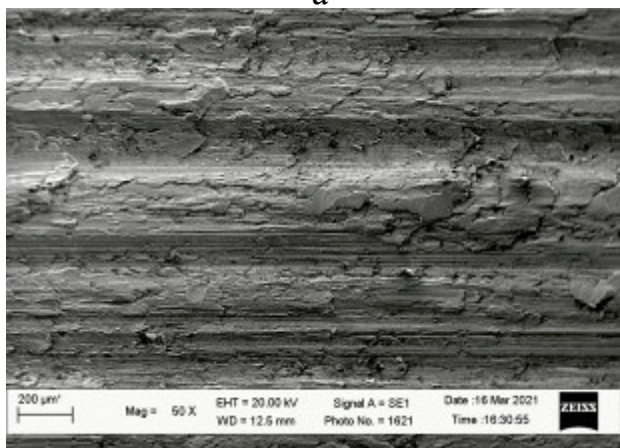
що перевищували межу текучості матеріалу і зумовили інтенсивне пластичне деформування нерівностей, їх загладжування.



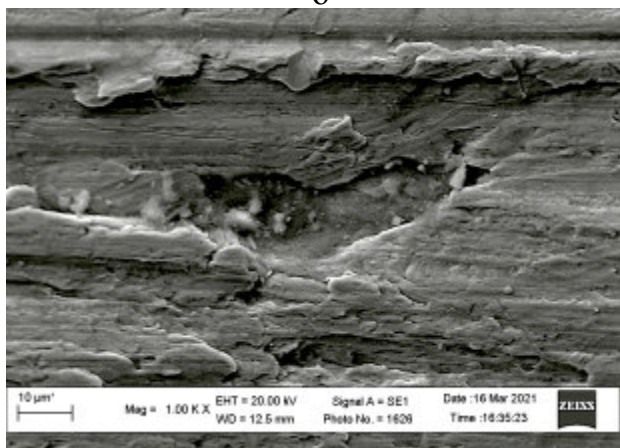
а



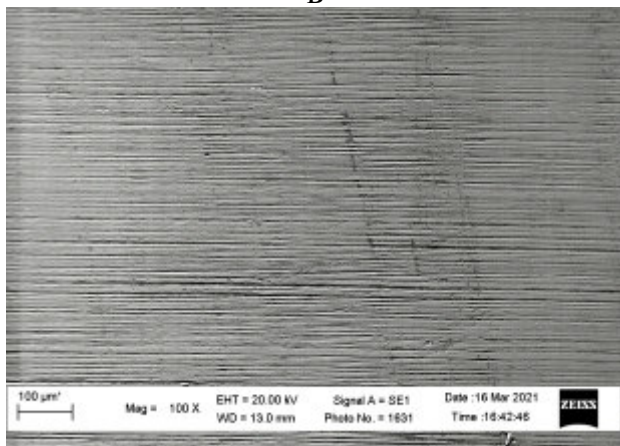
б



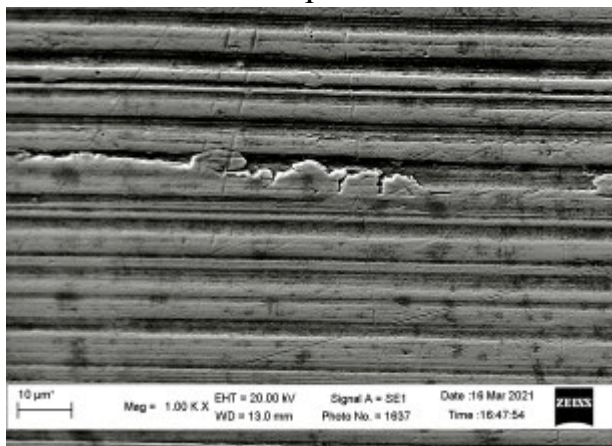
в



г



д



е

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

Рисунок 2.9 – Фотографії поверхні зразків при 100X збільшенні:

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

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

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

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

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

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

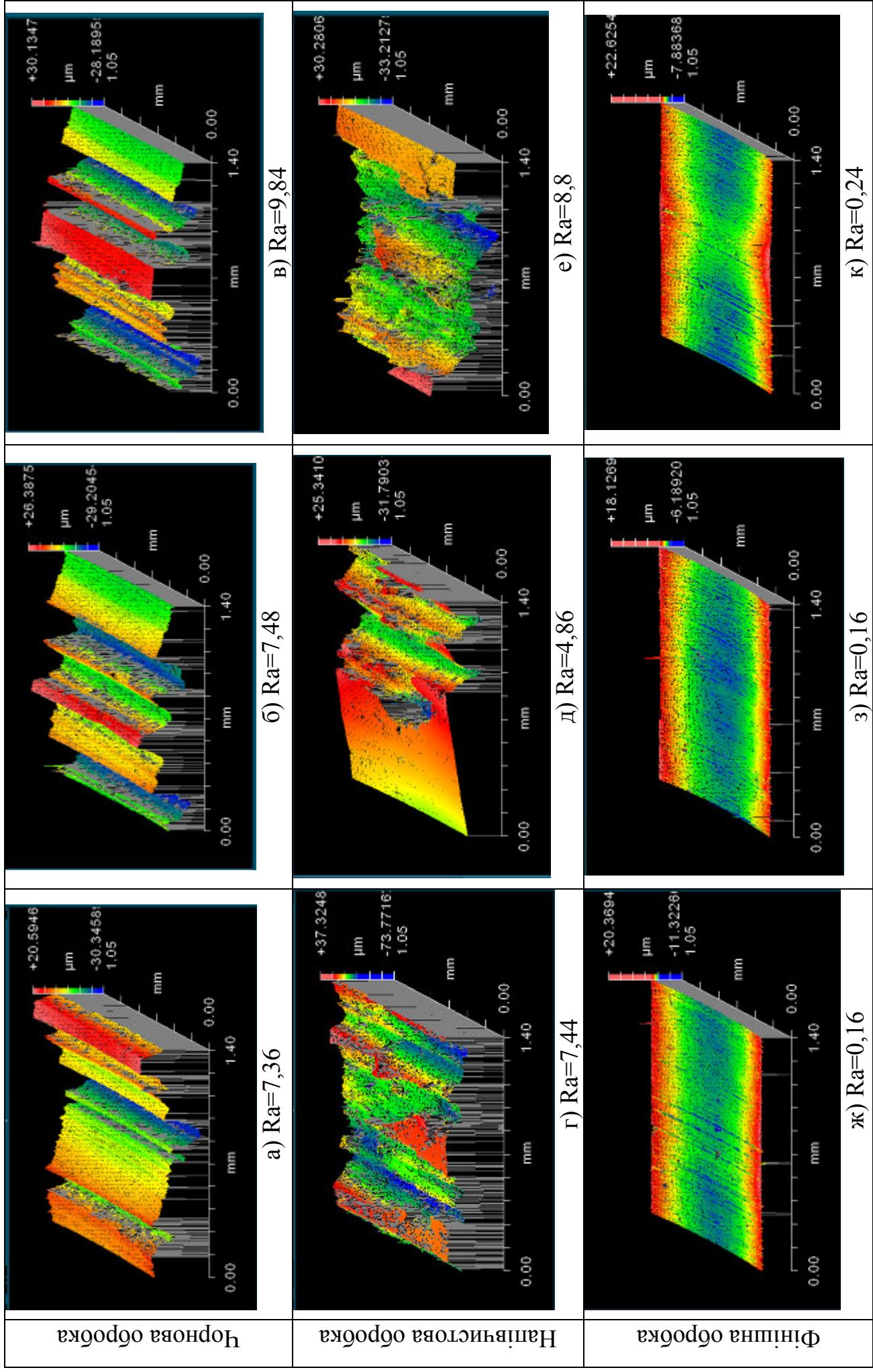


Рисунок 2.10 – 3D фотографії поверхонь дослідних зразків (розмір ділянки 1,4×1,5 мм)

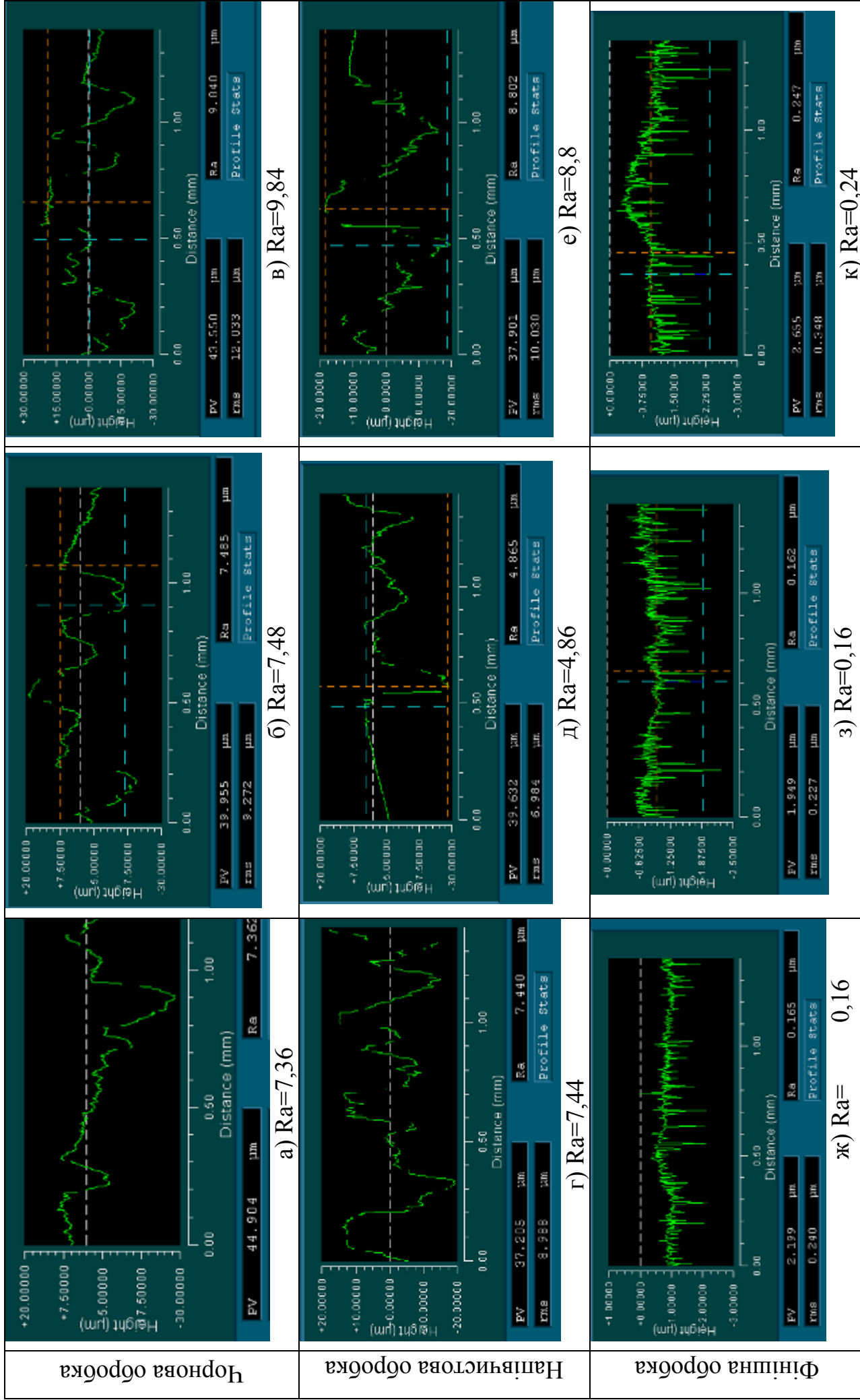
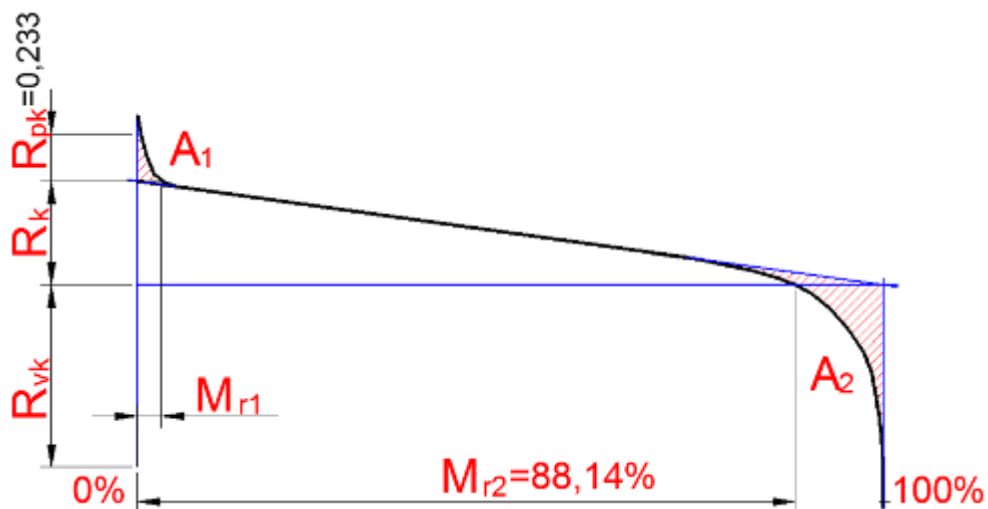


Рисунок 2.11 – Профілограми поверхонь дослідних зразків (розмір ділянки 1,4×1,5 мм)

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

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



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

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

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

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

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

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

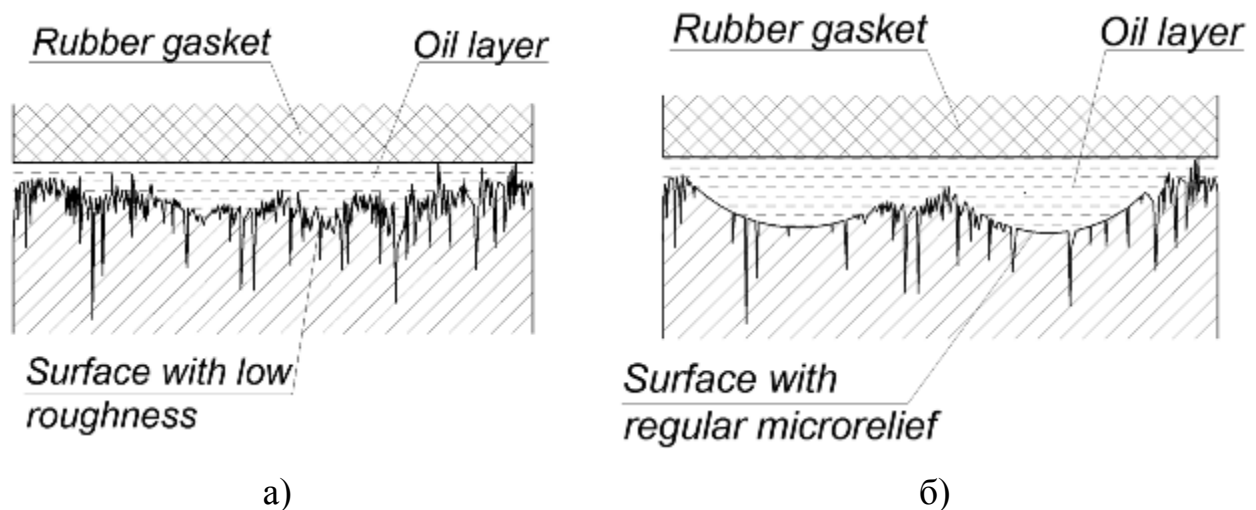
$$V_o = \frac{0,94(100 - 88,14)}{200} = 0,05574 \text{ мм}^3/\text{см}^2.$$

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

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

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

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



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

Рисунок 2.13 – Схеми взаємодії поверхонь:

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

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

За результатами експериментальних досліджень [269] виявлено, що висотні Ra та крокові S_m параметри шорсткості поверхні [110] отримані після напівчистового розточування задовольняють рекомендовані для даного виду спряження. Однак неоднорідна структура матеріалу поверхні гільзи, отримані на цій операції та глибокі риси, які спостерігаються на 3D фотографіях

поверхні після фінішної операції розкатування, при експлуатації гільзи будуть локальними дефектами, які з часом призведуть до утворення задирів та втрати герметичності з'єднання.

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

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

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

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

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

Для кількісної оцінки шорсткості існуючими стандартами передбачені відповідні параметри, зокрема: висота нерівностей профілю за десятьма точками – R_z і середнє арифметичне відхилення профілю – R_a . Із всіх конструктивно-геометричних і технологічних параметрів оброблюваної деталі і

металорізального інструмента при точінні, найбільший вплив на R_z і R_a має подача s . При чистовому обробленні різцем з радіусом r при його вершині, коли r більший від глибини різання t виходячи геометричної моделі величину R_z можна подати залежністю $R_z \approx s^2/8r$. З цього випливає, що функція $R_z = f(s)$ монотонна і має параболічний характер. Максимальний вплив s на R_z або R_a підтверджено цілим рядом емпіричних формул [157], у яких значення показника степеня при s максимальне.

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

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

Експериментальні дослідження впливу s на R_a здійснено для матеріалів двох груп сплавів: класу Fe-C, зокрема: сталі 45, сталі 30ХГСА, чавуну КЧ30-6 і кольорових сплавів, зокрема: сплаву алюмінію і кремнію –силумін АЛ4; сплаву алюмінію, міді і марганцю термічно оброблений – дюралюміній Д16Т; сплав міді і свинцю – латунь ЛС ЛС63-3. Сталі 45 і 30ХГСА перед обробленням піддавали нормалізації, а чавун КЧ30-6 - відпалу.

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

Таблиця 2.9 – Хімічний склад матеріалів дослідних зразків

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

Таблиця 2.10 – Фізико-механічні властивості матеріалів дослідних зразків

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

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

Дослідний зразок із сталі 30ХГСА оброблювався на модернізованому токарному верстаті з числовим програмним керуванням моделі СТЛЛ-100 на Волочиському машинобудівному заводі «Мотор-Січ».



Рисунок 2.14 – Визначення параметрів шорсткості на профілометрі моделі 296

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

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

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

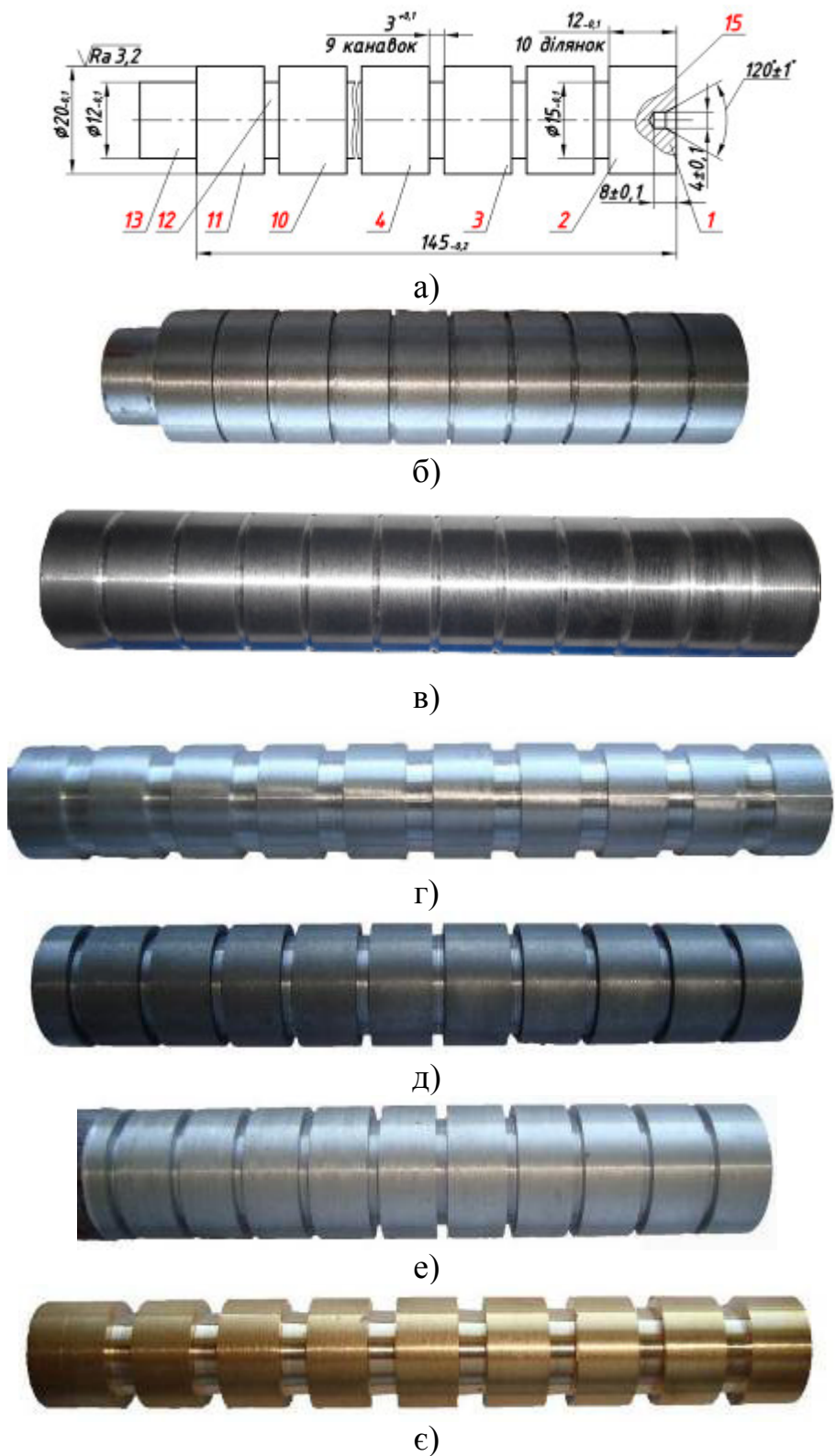
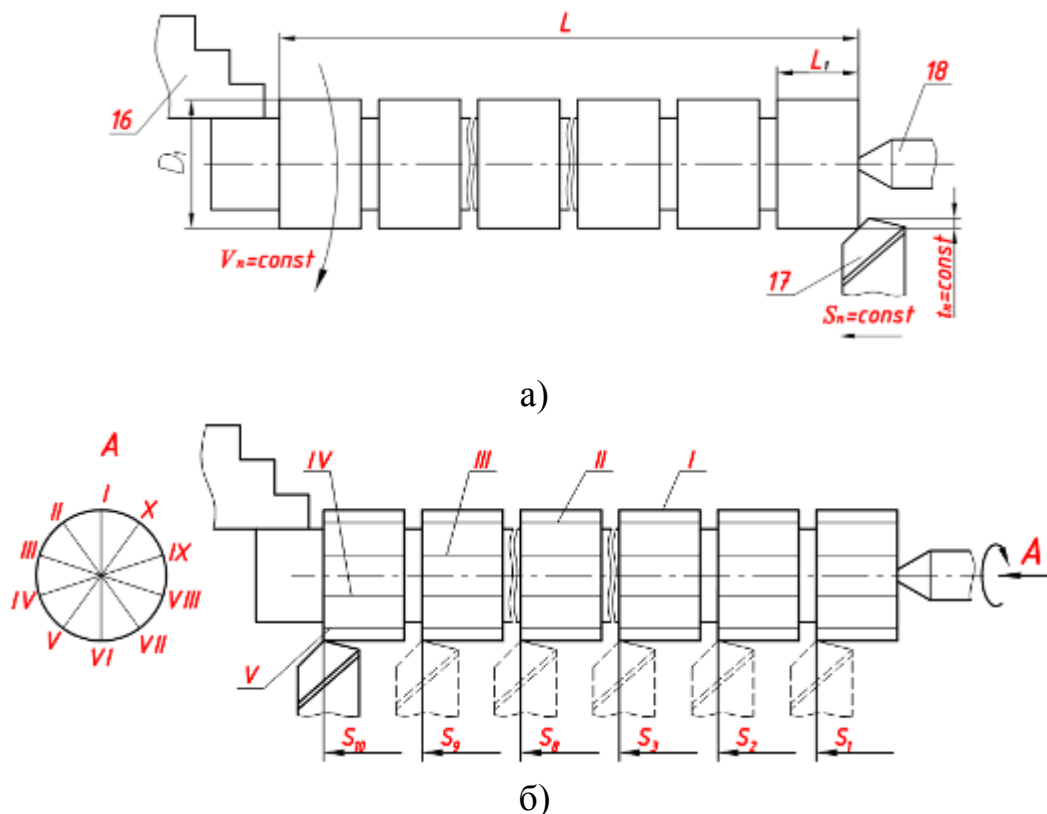


Рисунок 2.15 – Креслення та загальні вигляди дослідних зразків для дослідження впливу подачі на шорсткість обробленої циліндричної поверхні



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$c_{k_j} = \frac{1}{1 + \Phi(z_{k_2}) - \Phi(z_{k_1})}, \quad z_{k_1} = \frac{a_j - r_{k_j}}{\sigma_j}, \quad z_{k_2} = \frac{b_j - r_{k_j}}{\sigma_j}; \quad (2.23)$$

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

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

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

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

$$M(R_{a_j}) = \frac{a_j + b_j}{2} \prod_{k=1}^n c_{k_j} + \sum_{k=1}^n \prod_{i=k}^n c_{i_j} \left\{ \frac{\sigma_j}{\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{z_{k_1}^2}{2}} - e^{-\frac{z_{k_2}^2}{2}} \right) + r_{k_j} [\Phi(z_{k_2}) - \Phi(z_{k_1})] \right\} \quad (2.24)$$

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

Середнє квадратичне відхилення у цьому випадку буде дорівнювати

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

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

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

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

Процес різання здійснювався на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16K20 у лабораторії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя для всіх дослідних зразків окрім дослідного зразка із сталі 30ХГСА. Дослідний зразок із сталі 30ХГСА оброблювався на модернізованому токарному верстаті з числовим програмним керуванням моделі СТЛ-100 на Волочиському машинобудівному заводі корпорації «Мотор-Січ».

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Закінчення таблиці 2.14

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

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

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

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

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

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

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

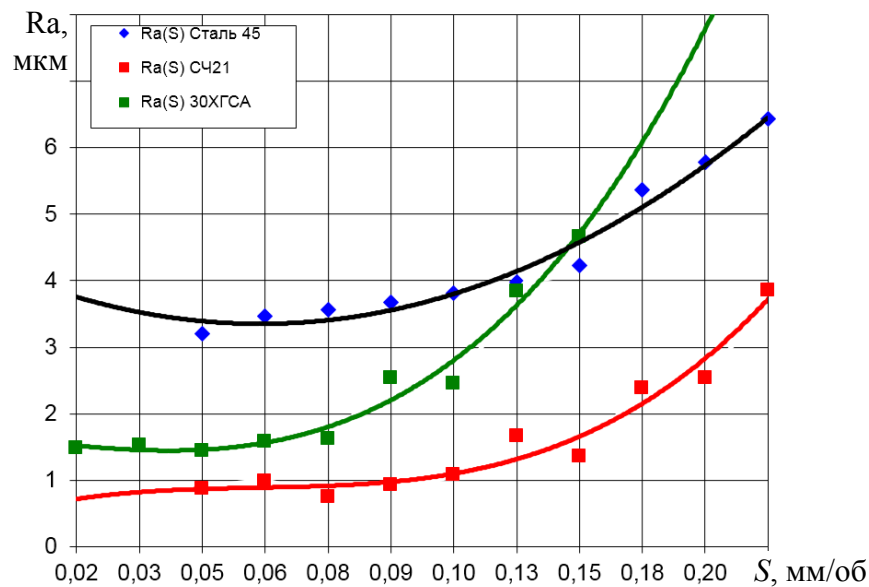
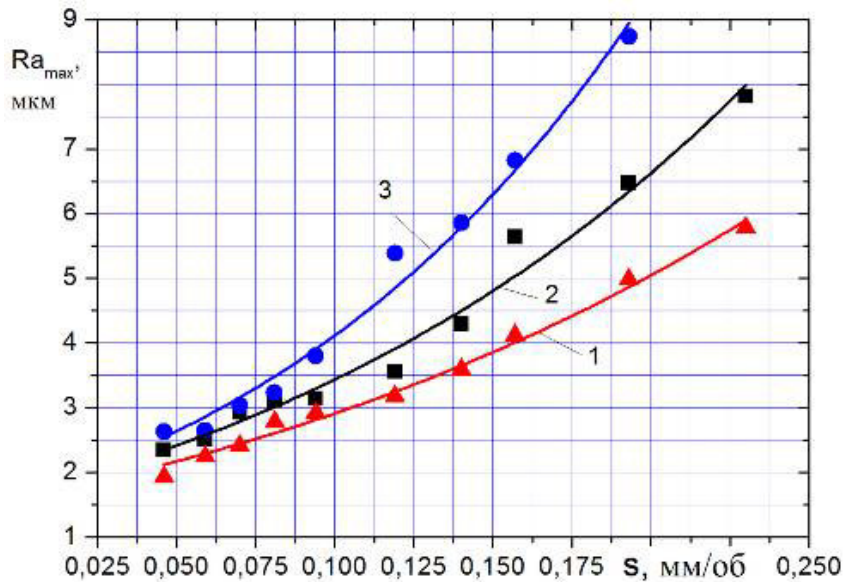


Рисунок 2.17 – Залежність вибіркового середнього параметра шорсткості

\bar{R}_a від подачі s для сплавів Fe-C



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

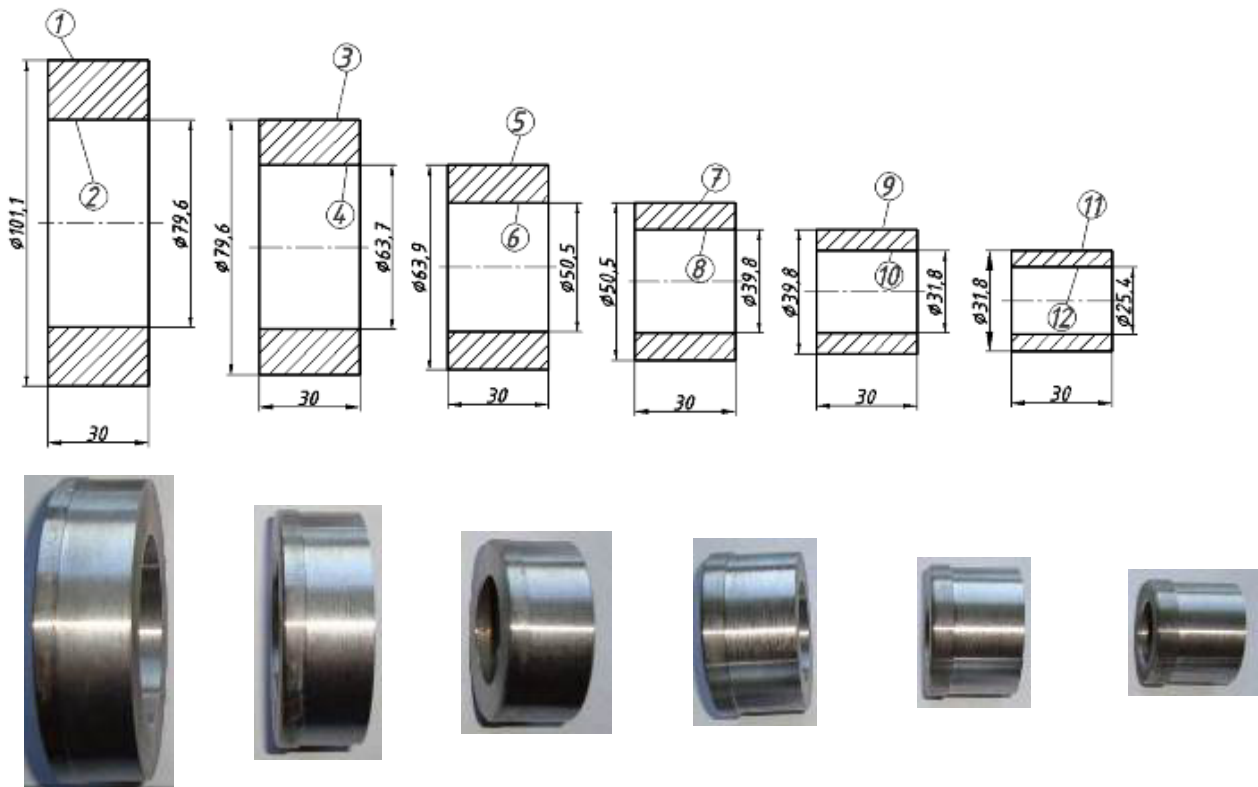


Рисунок 2.20 – Схематичне зображення комплекту дослідних зразків

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

Дослідження здійснювались в два етапи.

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

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

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

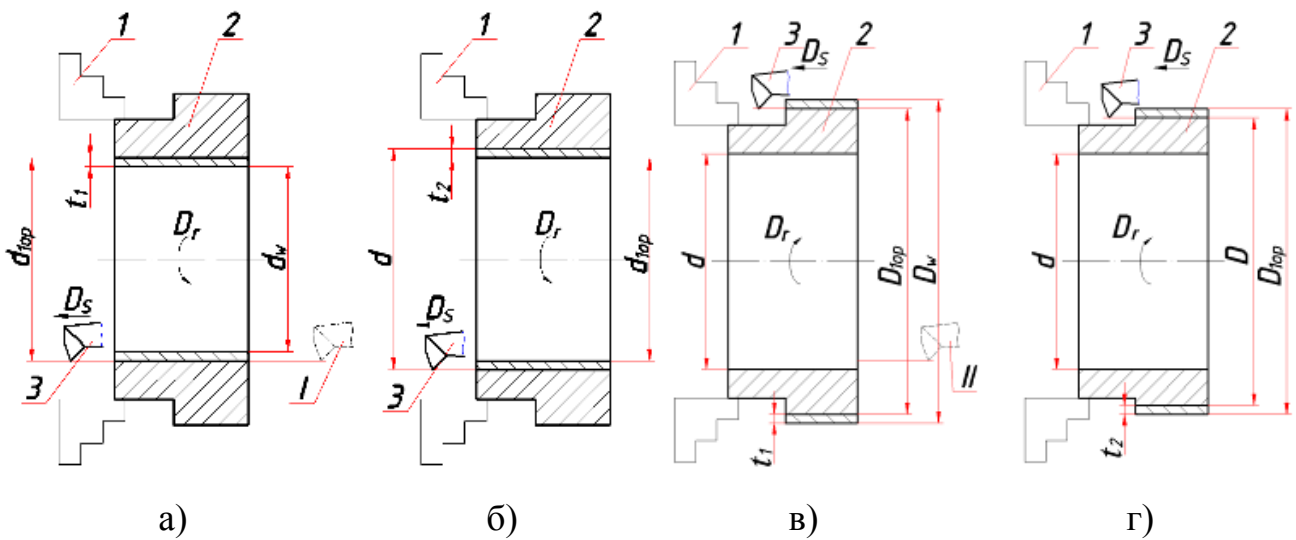
Технологія формування поверхонь наступна. На першому технологічному напівчистовому переході дослідний зразок як заготовку встановлювали у трьохкулачковий патрон токарно-гвинторізного верстату моделі 16K20 так, щоб забезпечувались мінімальні значення радіального і торцевого биття і закріплювали (рис.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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

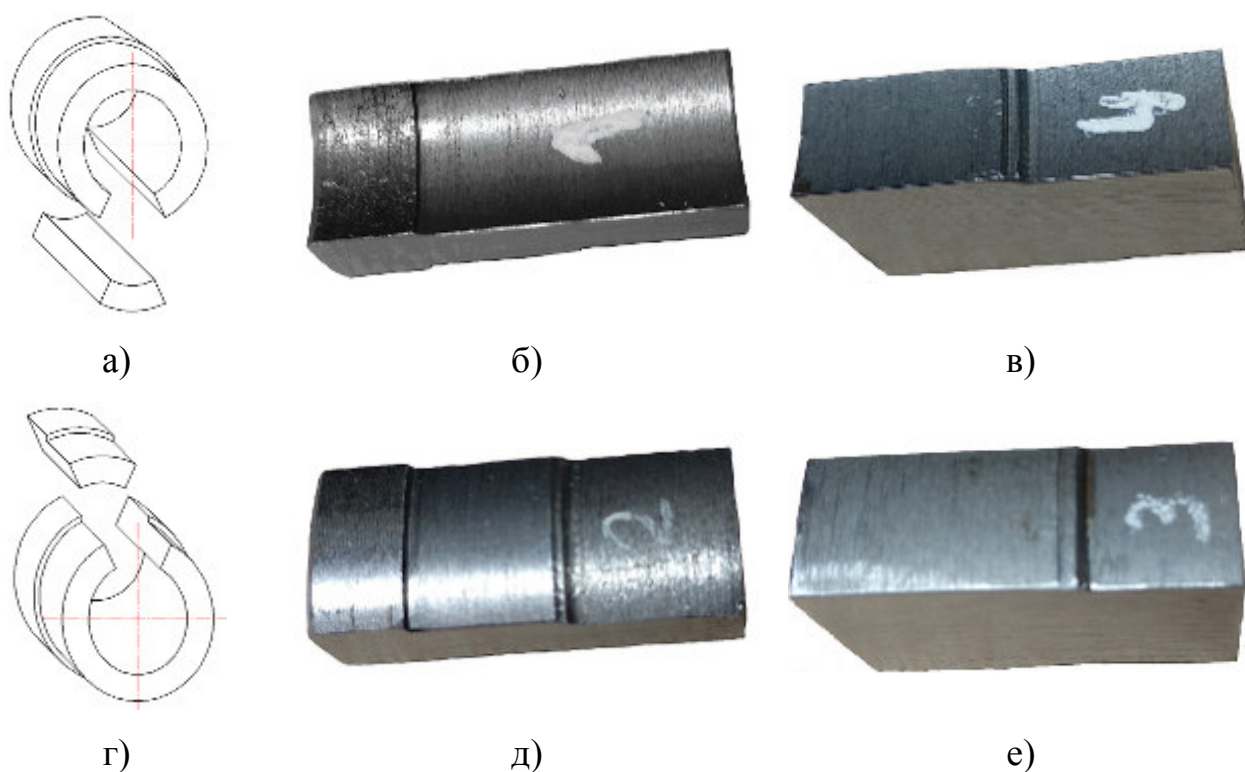
Таблиця 2.17 – Значення номінальних діаметрів D_j , параметра k_j їх поперечних перерізів, характеристик розсіювання: $M(\bar{R}_{a_j})$ і $D(R_{a_j})$ для зовнішніх циліндричних поверхонь та значень критеріїв t_{kG} і W

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

При цьому використовувався скануючий інтерференційний мікроскоп

білого кольору Zygo NewView 6200 (США). Цей мікроскоп надає можливість здійснювати тривимірний аналіз мікрорельєфу відбиваючої поверхні, створює графічне зображення і здійснює цифровий аналіз, що забезпечує одержання високоточних даних про структуру поверхні досліджуваного зразка.

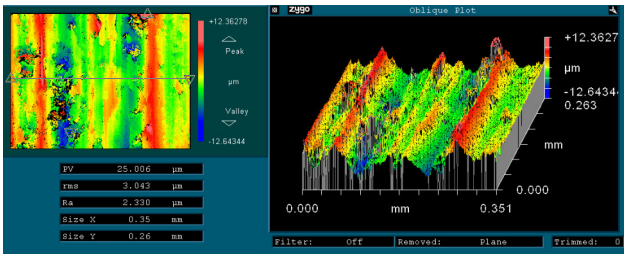
Для здійснення досліджень шорсткості циліндричних поверхонь сформованих при однакових режимах різання, але з різними діаметрами поперечних перерізів циліндричних поверхонь із раніше отриманих дослідних зразків вирізали сегменти, які зображені на рисунку 2.22.



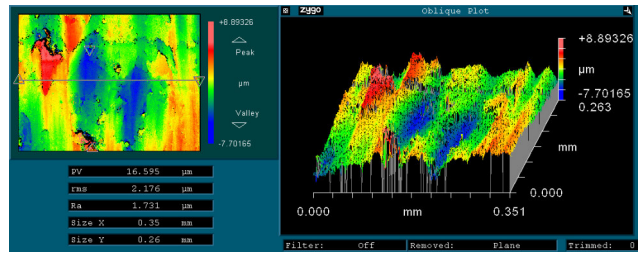
а), г) – схеми формування; б), в) – внутрішні циліндричні поверхні з параметрами відповідно $k = 0,031$ і $k = 0,078 \text{ мм}^{-1}$; д), е) – зовнішні циліндричні поверхні з параметрами відповідно $k = 0,020$ і $k = 0,063 \text{ мм}^{-1}$.

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

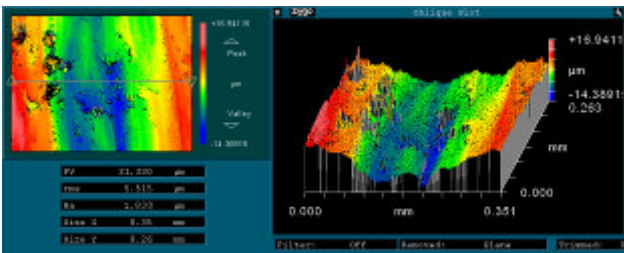
В результаті здійснення 3-D профілометрії отримали на встановленій одиничній площі $x \times y = 0,35 \times 0,26 \text{ мкм}$ фотографії мікрорельєфів, окремі зразки яких подані на рис. 2.23.



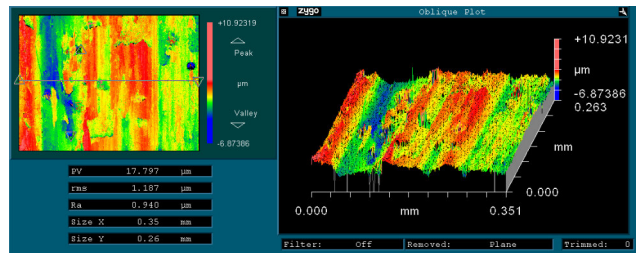
$$R_a = 2,33 \text{ мкм}; d=23,4 \text{ мм}; k=0,078 \text{ мм}^{-1}$$



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



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



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

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

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

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

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

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

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

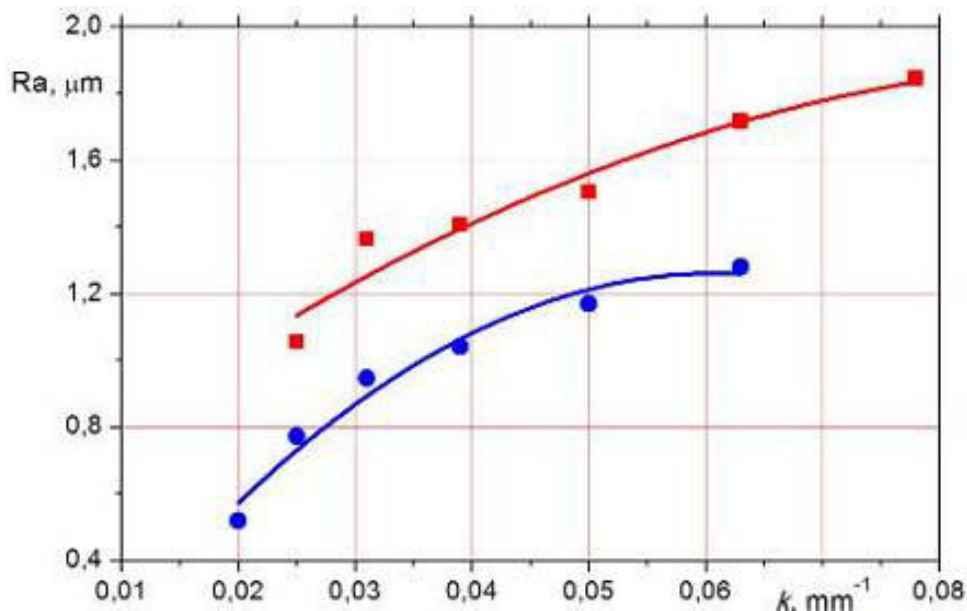
Окрім цього, використавши критерій W [260] підтвердили гіпотезу про нормальний закон розподілу величини R_a . Необхідно відзначити, що критерій W є більш потужніший ніж критерій Пірсона χ^2 , коли має місце обмежена кількість членів вибірки (таблиці 2.17, 2.18).

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

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

Таблиця 2.19 – Значення критеріїв Стюдента для характеристик розсіювання випадкових величин за середнім значенням \bar{R}_a зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь з однаковим параметром k

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



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

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

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

На першому етапі досліджень середнє відхилення профілю R_a

визначалося як випадкова величина і за ґрунтовну оцінку приймали його математичне сподівання, а окремі реалізації профілю подавались як плоска задача. Аналіз результатів досліджень виконаних на першому етапі досліджень показав, що значення характеристик параметра шорсткості R_a отриманих при однакових діаметрах поперечних перерізів суттєво відрізняються від значень характеристик параметра шорсткості R_a отриманих на другому етапі досліджень у тривимірному просторі. Разом з тим закономірність впливу збільшення діаметра поперечних перерізів досліджуваних циліндричних поверхонь на зростання величини R_a як за даними експериментів першого і другого етапів зберігається.

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

2.5 Спосіб аналітичного опису профілю поверхні

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

геометричних особливостей мікрорельєфу. Компоненти запропонованої моделі враховують сегменти-цикли циклічного мікрорельєфу. Дана програма створена на основі нового методу моделювання, що враховує нову математичну модель і дозволяє закласти в процедуру моделювання параметри амплітуди на кожному сегменті-циклі у структурі мікрорельєфу поверхні металу.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для порівняння запропонованої моделі із аналогом проведено комп'ютерне моделювання реалізацій мікрорельєфу та проведено оцінювання відносних похибок $\delta(k)$ за прототипом, які наведені в таблиці 2.20 та запропованою моделлю – в таблиці 2.21. Графічно результати моделювання проілюстровані графічним матеріалом.

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

Таблиця 2.20 – Дані отримані за результатами розрахунку за прототипом

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

Таблиця 2.21 – Дані отримані за результатами розрахунку за запропованою моделлю

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

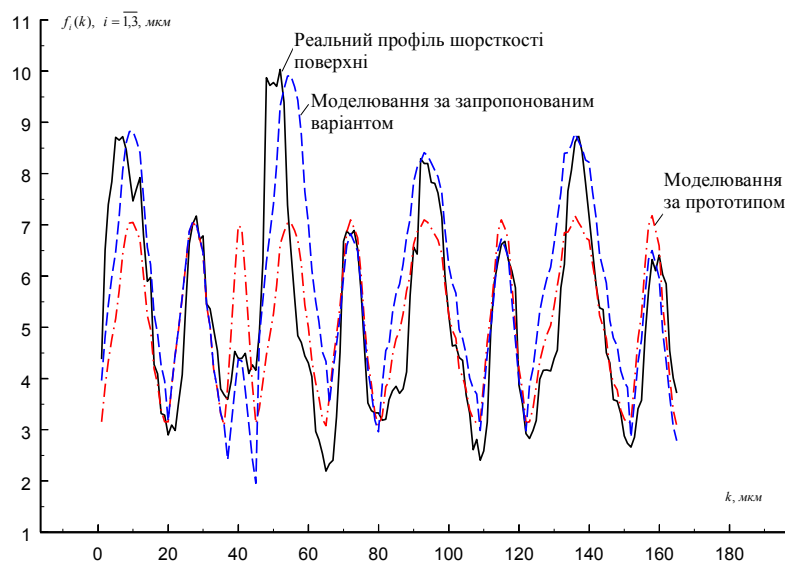


Рисунок 2.25 – Порівняння результатів моделювання існуючих моделей для аналітичного опису профілю поверхні із запропованою

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

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

Відображення у вигляді графіка отриманих результатів моделювання.

Опис структури програми „Моделювання реалізації мікрорельєфу”.

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

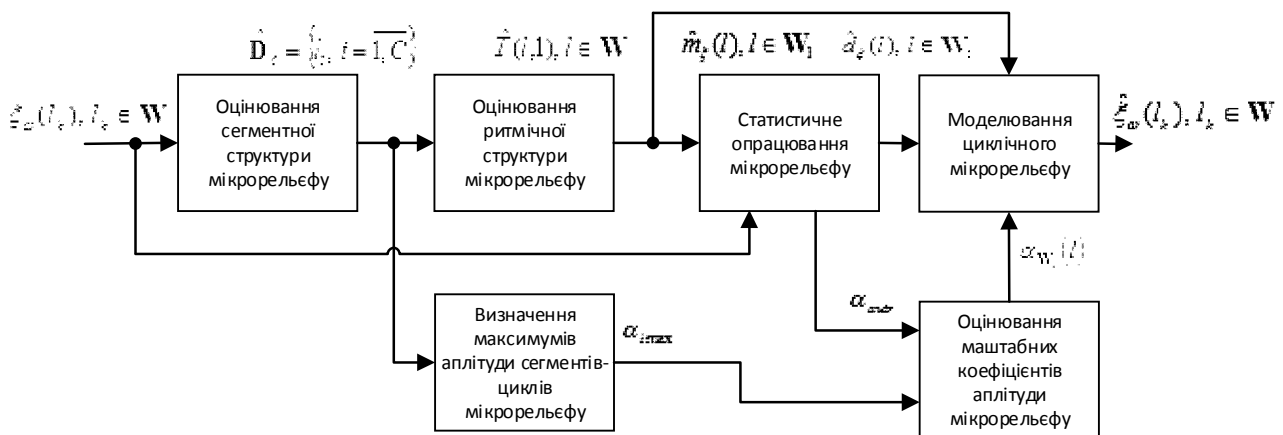


Рисунок 2.26 – Структурно-функціональна схема програми „Моделювання реалізації мікрорельєфу”

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

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

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

У блоці «Відображення результатів» візуалізуються отримані результати у вигляді графіків.

У блоці «Статистичної обробки» проводиться визначення статистичних оцінок математичного сподівання, дисперсії та автокореляційної функції.

У блоці «Моделювання» здійснюється процес моделювання реалізацій мікрорельєфу.

Програма працює наступним чином.

Спочатку вхідні дані (у форматі *.txt) завантажуються у програму. Для контролю вводу правильних даних в комп'ютерній програмі передбачена можливість візуалізації введених даних. Як приклад на рисунку 2 поданий загальний вигляд інтерфейсу програми для візуалізації даних рис.2.27.

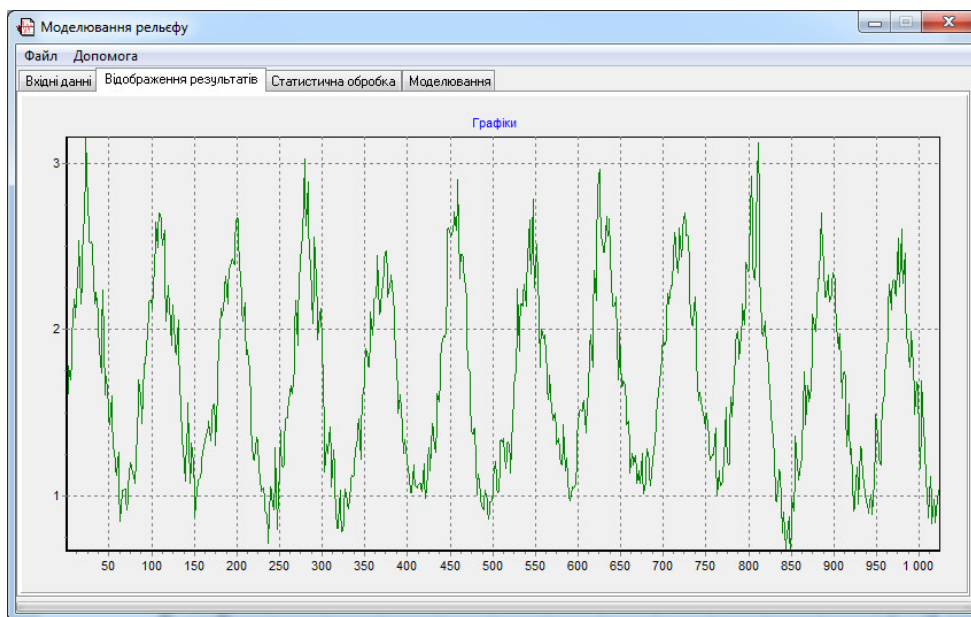


Рисунок 2.27 – Загальний вигляд інтерфейсу програми для візуалізації вхідних даних

Після введення необхідних даних необхідно провести їх статистичне опрацювання та отримати статистичні оцінки математичного сподівання та дисперсії.

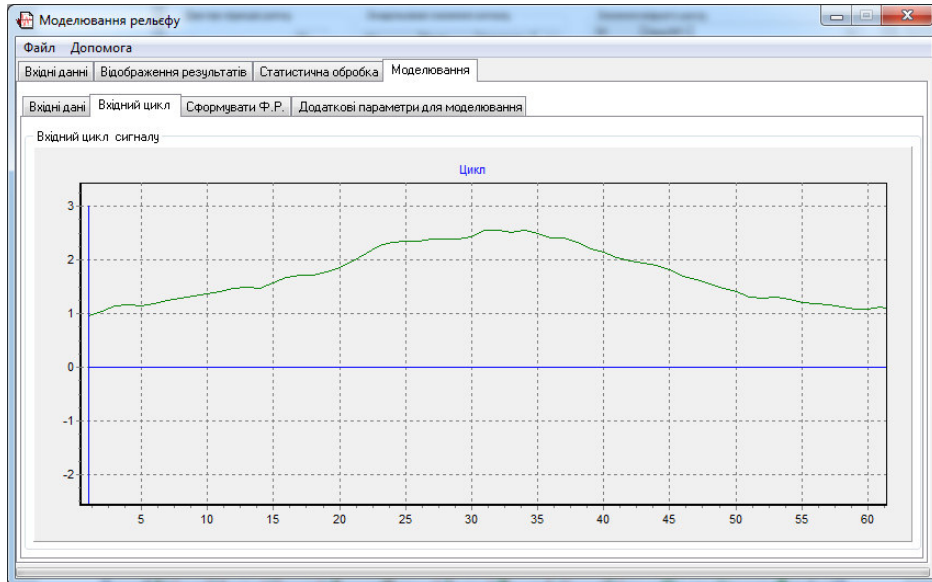


Рисунок 2.28 – Інтерфейс програми для відображення оцінки математичного сподівання досліджуваного мікрорельєфу.

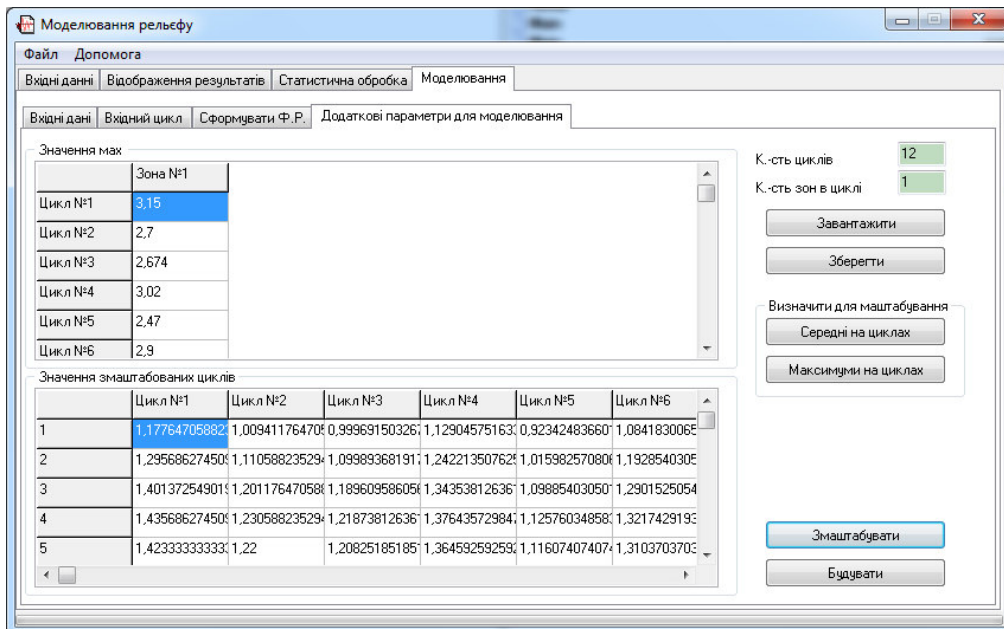


Рисунок 2.29 – Інтерфейс програми для відображення масштабних коефіцієнтів досліджуваного мікрорельєфу.

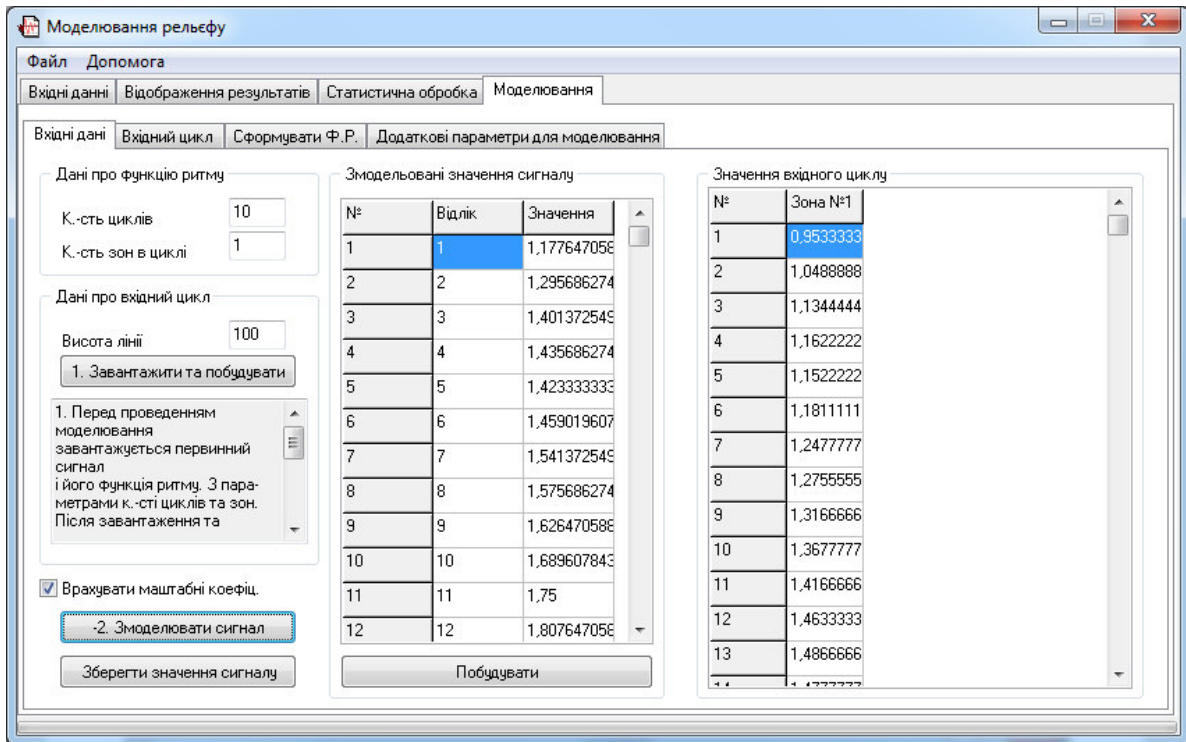


Рисунок 2.30 – Інтерфейс програми для відображення даних для моделювання реалізації мікрорельєфу.

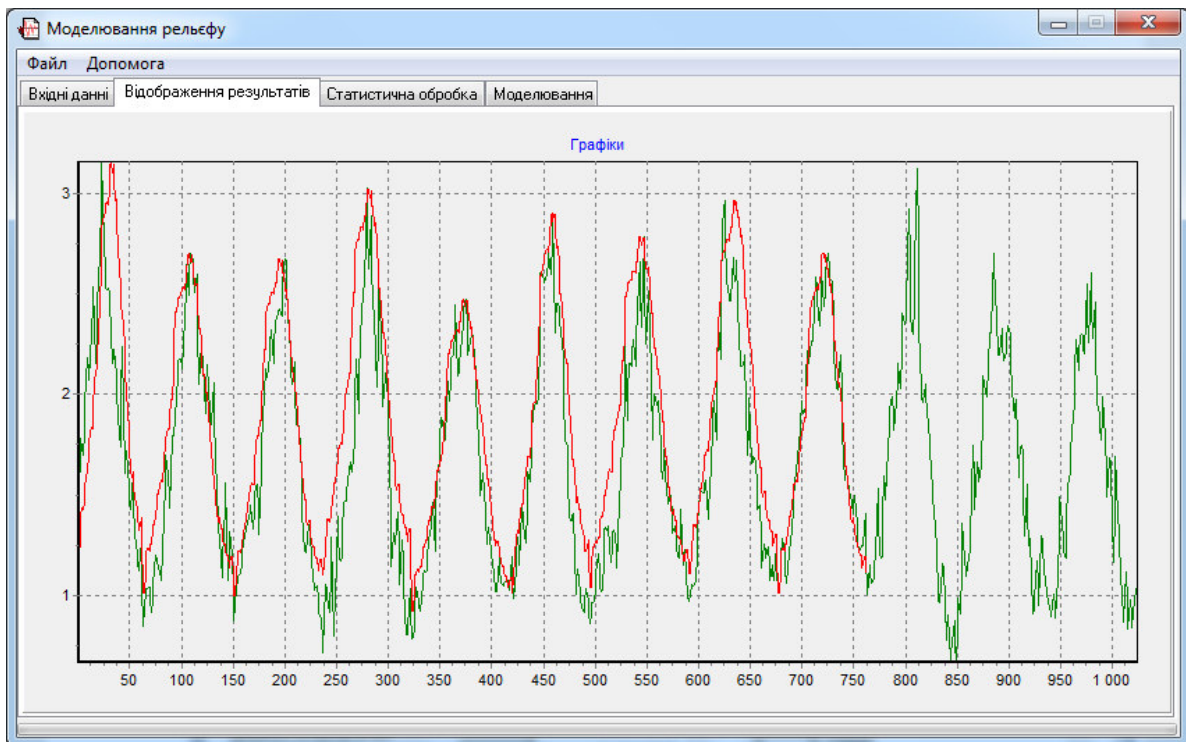


Рисунок 2.31– Інтерфейс програми для відображення результатів моделювання реалізації мікрорельєфу.

Приклад інтерфейсу програми де завантажена оцінка математичного сподівання досліджуваної профілограми наведено на рисунку 2.28. На рисунку 2.29 наведений приклад визначення масштабних циклів згідно запропонованого методу. На рисунку 2.30 поданий приклад інтерфейсу для проведення моделювання реалізації мікрорельєфу. Приклад відображення отриманих результатів моделювання наведено на рисунку 2.31 (червоним кольором).

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ

3.1 Розрахунок параметрів дворіцевої адаптивної розточувальної головки

Інтенсифікація режимів функціонування сучасних машин з одночасним ускладненням умов їх експлуатації ставить необхідність значного підвищення якості поверхонь деталей, які є виконавчими органами цих машин. В першу чергу це стосується довгомірних внутрішніх циліндричних поверхонь сформованих розточуванням з використанням спеціального інструментального оснащення, зокрема розточувальних інструментів.

При цьому однією з найважливіших проблем у забезпеченні високої якості таких поверхонь є забезпечення постійності показників якості, зокрема шорсткості і точності по всій довжині отворів, особливо у деталях з не перпендикулярним до осі отвору торцем. Ця проблема, у певній мірі, вирішується використанням запропонованого інструментального оснащення, що безперечно є актуальним.

Обробка отворів самоустановлювальними інструментами внаслідок великої їх жорсткості виключає чи суттєво знижує вплив факторів, які викликають похибку розміру, а саме: геометричні неточності верстата та пристосувань, похибки базування оброблюваної деталі та інструменту, податливість технологічної системи, нестабільність механічних властивостей оброблюваного матеріалу, тощо [190, 198, 155].

В роботі [94] розглянуто умови самовстановлюваності плаваючих різцевих блоків в комбінованому інструменті при обробленні отворів на труборозточувальних верстатах. Інструмент із інструментальним блоком та пружними зв'язками, який забезпечує самовстановлення в перехідних процесах, дозволяє розглядати розточування отвору як неперервний процес, що

дає можливість не зменшувати режими різання при обробленні отвору в процесі врізання інструменту зі сторони не перпендикулярного торця деталі, а також отримати високу якість обробленої поверхні без додаткового використання спеціальних інструментів, які використовують для отримання отворів високої точності [100].

Найбільш перспективним методом усунення неспіввісності осей інструменту та заготовки при обробленні отворів є використання самовстановлювальних інструментів, з яких найбільш технологічними є плаваючі дволезові блоки [100].

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

Визначенню оптимальних конструктивних параметрів самовстановлювальних інструментів присвячені роботи [197, 180]. Однак при аналізі літературних та патентних джерел не було виявлено технічних рішень, зокрема інструментів для розточування, які б дозволяють керувати точністю обробки внутрішніх циліндричних поверхонь при їх обробленні.

Метою даного дослідження є розроблення конструкції прогресивної дворізцевої адаптивної розточувальної головки та методики налаштування її на задану точність оброблення. Прогресивна дворізцева адаптивна розточувальна головка (рис. 6.1) складається з корпусу 1 у вигляді кронштейна, з хвостовиком 29, на якому виконана різева поверхня 27 і конічна поверхня 29 з одного боку і U-подібні виступи 30 і 36 з іншого, які паралельні осі хвостовика 28. В U-подібних виступах 30, 36 виконані співвісні отвори 32 і 33 у яких встановлена вісь 35, що зафіксована гайкою 34. На цій осі 35, з можливістю повороту, у паз 5 встановлений рівноплечий важіль 10, на кінцях якого закріплені швидкозмінні твердосплавні різальні елементи 9 і 19.

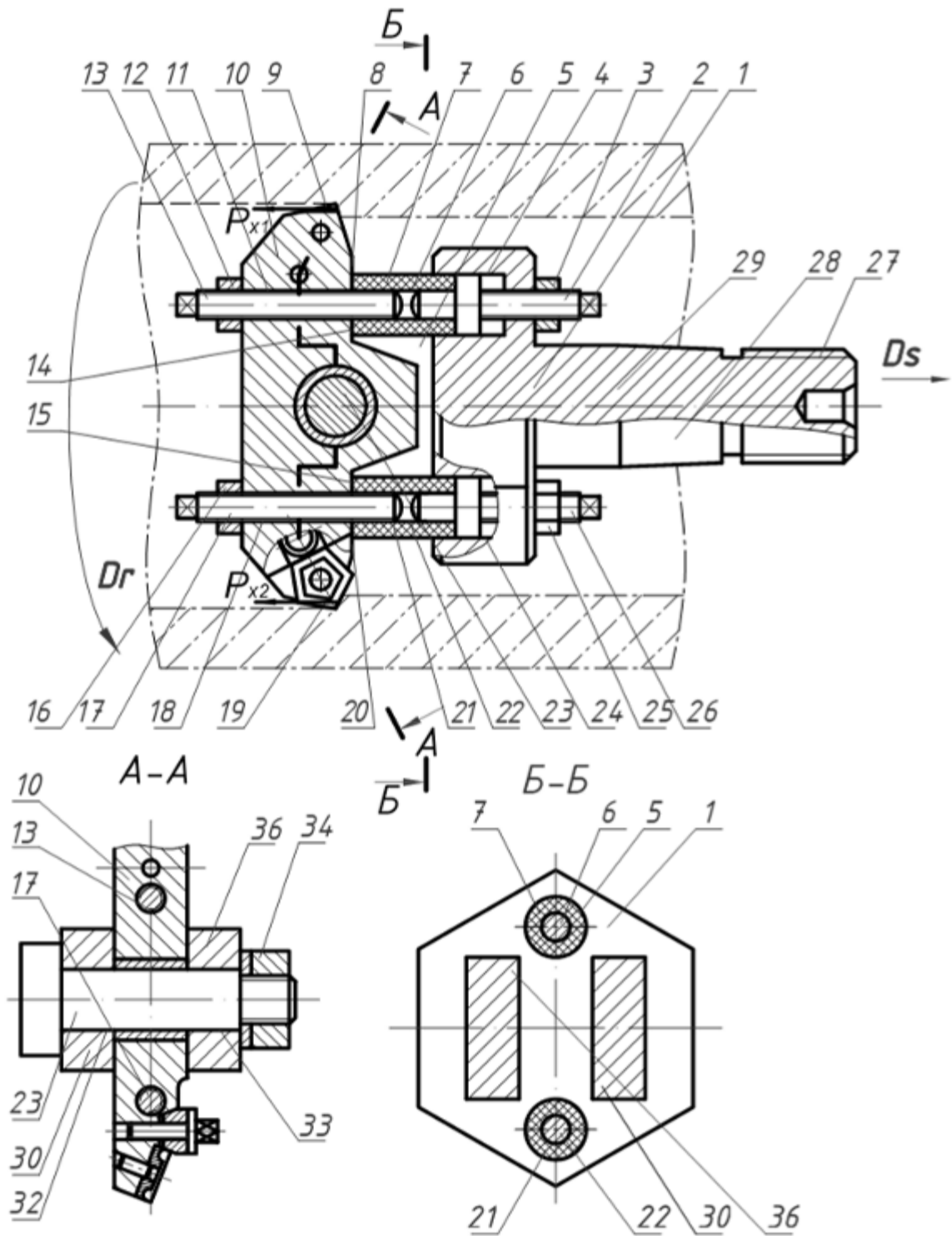


Рисунок 3.1 – Конструкція прогресивної дворізевої адаптивної розточувальної головки [129]

У корпусі 1, в діаметрально-протилежних напрямках, паралельно U-подібним бічним виступами 30 і 36, напроти рівноплечого важеля 10 виконані два ступінчасті отвори 4 і 24, в яких розміщені упорні гвинти 2 і 26 довжиною

більшою довжини отворів 4 і 24 і з сторони хвостовика ці упорні гвинти зафіксовані гайками 3 і 25. У рівноплечому важелі 10, співвісно із ступінчастими отворами 4 і 24, виконані наскрізні різеві отвори 11 і 18 у які загвинчені регулювальні гвинти 13 і 17.

Для зменшення дії ударних навантажень на упорних та регулювальних гвинтах, що можуть виникати при врізанні ріжучих елементів в тіло заготовки доцільно використовувати пружні демпфери.

У ступенях більшого діаметра ступінчатих отворів 4 і 24 встановлені пустотілі циліндричні пружні демпфери 7 і 21, які своїми внутрішніми циліндричними поверхнями 6 і 22 спряжені з одного боку з упорними ступінчастими гвинтами 2 і 26, а з другого боку з регулювальними гвинтами 13 і 17.

Довжина регулювальних гвинтів 13, 17 більша від довжини наскрізних різевих отворів 11, 18 виконаних у рівноплечому важелі 10. На кінцях упорних і регулювальних гвинтів 2, 26 і 13, 17, що розміщені у пружних демпферах 7 і 21 виконані сферичні поверхні, радіус яких r не менший від величини

$$r \geq \sqrt{\frac{10 \cdot C_p \cdot t^{x_{py}} \cdot s^{y_{py}} \cdot K}{0,785 \cdot [\sigma]_{зм}}}, \quad (3.1)$$

де C_p – коефіцієнт пропорційності у емпіричній формулі для визначення складової P_x ;

t – глибина різання, мм;

x_{py}, y_{py} – показники степенів, які характеризують вплив глибини різання і подачі складову P_x ;

s – подача, мм/об;

K – поправочний коефіцієнт;

$[\sigma]_{зм}$ – допустиме зусилля змінання матеріалу гвинтів, МПа.

Лівими торцями пружні демпфери 7 і 21 оперті на плоскі поверхні 8 і 20

рівноплечого важеля 10.

Перед використанням прогресивної дворіцевої адаптивної розточувальної головки здійснюють її налагодження. Попередньо за встановленими елементами режиму різання (глибиною, подачею і швидкістю різання) з врахуванням фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, використовуючи відомі емпіричні формули, визначають розрахункову величину осьової складової сили різання – P_x . Експериментально визначають середню жорсткість c_{np} окремих пружних демпферів навантажуючи їх осьовою змінною відомою силою F_{oi} і вимірюючи при цьому величину пружної деформації Δ_{npi} , за формулою:

$$c_{np} = \left(\frac{F_{01}}{\Delta_{np1}} + \frac{F_{02}}{\Delta_{np2}} + \dots + \frac{F_{0n}}{\Delta_{npn}} \right) \frac{1}{n}, \quad (3.2)$$

де $F_{01} < F_{02} < \dots < F_{0n}$ – значення осьових зусиль, які прикладені до пружних демпферів;

$\Delta_{np1}, \Delta_{np2}, \dots, \Delta_{npn}$ – значення величин деформацій від прикладання відповідних осьових зусиль;

n – кількість значень осьових зусиль які прикладаються до кожного із пружних демпферів.

Встановлюють і закріплюють, загвинчуючи прогресивну дворіцеву адаптивну розточувальну головку її різивою поверхнею 27 у різевий отвір оправки для закріплення у різцетримачі токарного верстата і одночасно з тим базуючи її по конічній поверхні 28. Загвинчують попередньо упорні ступінчасті гвинти 2 і 26 і деформують пружні демпфери 7 і 21 створюючи при цьому зусилля на кожному демпфері величиною $(0,3-0,5)P_x$. На супорті верстата встановлюють мікроскоп, в окулярі оптичної системи якого розміщена Декартова система координат. Мікроскоп встановлюють так, щоб вертикальна вісь співпадала з горизонтальною твірною U-подібних бічних виступів 30 і 36, а вертикальна вісь співпадала з вершинами швидкозмінних твёрдосплавних

різальних елементів. У випадку, коли вершини швидкозмінних твердосплавних різальних елементів не співпадають з вертикальною віссю шкали, догвинчуванням відповідних упорних ступінчастих гвинтів 2 або 26 добиваються співпадання вершин різальних елементів з вертикальною віссю Декартової системи координат.

Положення упорних ступінчастих гвинтів 2 і 26 зафіксують гайками 3 і 25. В подальшому загвинчують регульовальні гвинти 13 і 17 до контакту їх сферичних поверхонь з сферичними поверхнями упорних ступінчастих гвинтів 2 і 26 зафіксованих гайками 3 і 25. Знаючи крок різі t_p на регульовальних гвинтах 13 і 17 і маючи розрахункову величину Δ , ці регульовальні гвинти відгвинчують на кут θ із наступною їх фіксацією, який визначається із залежності: $\theta = 360 \cdot \Delta / t_p$, град.

Для випадку, коли поля допусків отворів розміщені у системі отвору «Н» величину Δ , визначимо скориставшись розрахунковою схемою поданою на рис. 2. Необхідно відзначити те, що розрахункова схема подана на рис. 6.2 справедлива для випадків, коли відхилення діаметра обробленої внутрішньої циліндричної поверхні можуть бути розміщені за іншими схемами розміщення полів допусків, наприклад P, Js, D .

При цьому прийняте допущення, що при взаємодії упорних та регульовальних гвинтів головки їх пружні деформації достатньо малі і тому їх не враховують;

Взаємні положення упорних і регульовальних гвинтів та величину Δ зазору між ними у положенні визначали з розрахункової схеми (рис. 6.2).

У загальному, використавши позначення $A_0O_1 = a$, $O_1C = FO_3 = r$; $AO_3 = X_{O_3}$ отримаємо $\Delta = X_{O_3} - (a + 2r)$.

Таким чином, для визначення величини Δ , як параметра налаштування прогресивної дворізевої адаптивної розточувальної головки, необхідно знайти величину X_{O_3} .

Координати точки O_3 знайдемо як координати точки перетину кола з

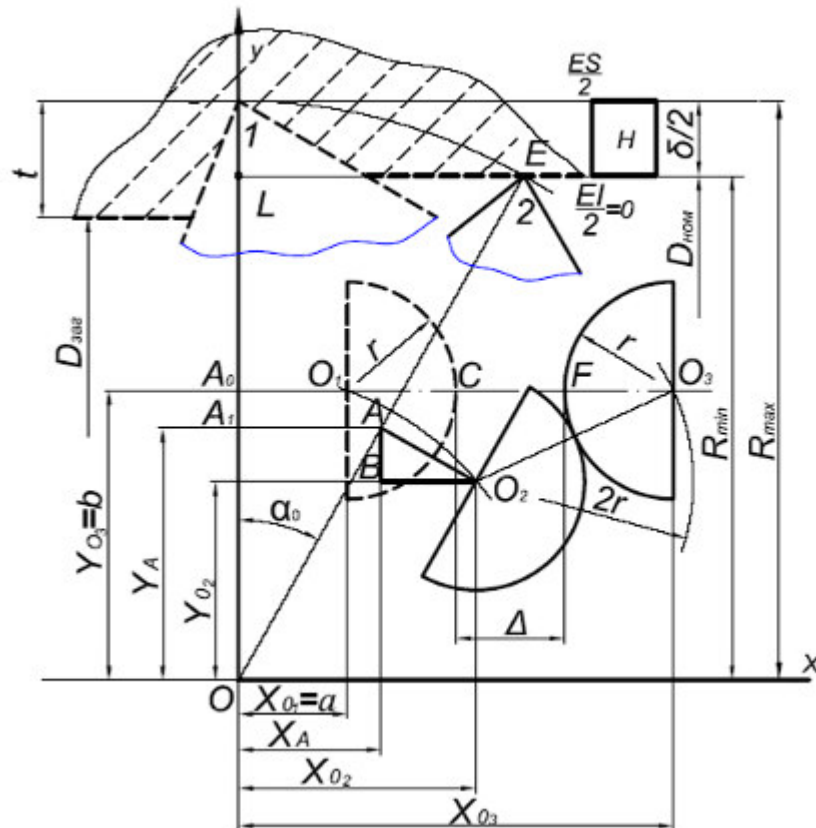
радіусом $2r$ з центром в т. O_2 з прямою A_0O_3 .

Для того, щоб записати рівняння кола з радіусом r і центром у точці O_2 , визначались координати точки O_2 . Спочатку знайдемо величину кута α_0 .

$$\text{Розглянемо } \triangle OLE; OE=R_{max}; OL=R_{min}=R_{max}-\frac{\delta}{2}.$$

$$\text{Звідки } \cos \alpha_0 = \frac{2 \cdot R_{max} - \delta}{2 \cdot R_{max}} = 1 - \frac{\delta}{2 \cdot R_{max}},$$

де R_{max} – максимально допустимий радіус обробленої циліндричної поверхні;
 δ – допуск відповідного квалітету на діаметр обробленої поверхні, мм. δ визначається як $ES-EI$, де ES – верхнє граничне відхилення, мм, а EI – нижнє граничне відхилення, мм.



1 – початкове положення вершини різця; 2 – максимально можливе кінцеве положення вершини різця

Рисунок 3.2 – Розрахункова схема для визначення величини зазору Δ між упорними і регулювальними гвинтами прогресивної дворіцевої розточувальної ГОЛОВКИ

Відповідно

$$\alpha_0 = \arccos\left(1 - \frac{\delta}{2 \cdot R_{\max}}\right) \quad (3.3)$$

.

Використавши властивості обернених тригонометричних функцій, можемо записати

$$\sin \alpha_0 = \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{\delta}{2 \cdot R_{\max}} \right) \right]. \quad (3.4)$$

Звідки отримаємо

$$\alpha_0 = \arcsin \sqrt{4\delta \cdot R_{\max} - \delta^2} / 2R_{\max}, \quad (3.5)$$

З $\triangle OA_1A$ з врахуванням того, що $AO = A_0O$ і прийнявши, що $OA_0 = b$, отримаємо координати точки А: абсцису $X_A = b\sqrt{4\delta \cdot R_{\max} - \delta^2} / 2R_{\max}$; ординату $Y_A = b(1 - \delta / 2R_{\max})$.

Розглянувши $\triangle ABO_2$, визначимо координати X_{O_2} і Y_{O_2} центра кола, який розміщений у т. O_2 з радіусом r_k і скориставшись $\triangle ABO_2$ після спрощень, отримаємо в системі координат XOY :

$$X_{O_2} = \frac{b\sqrt{4 \cdot \delta \cdot R_{\max} - \delta^2} + 2aR_{\max} - \delta \cdot a}{2 \cdot R_{\max}}, \quad (3.6)$$

$$Y_{O_2} = \frac{2 \cdot b \cdot R_{\max} - \delta \cdot b - a\sqrt{4 \cdot \delta \cdot R_{\max} - \delta^2}}{2 \cdot R_{\max}}, \quad (3.7)$$

Тоді рівняння кола з центром в т. O_3 і її координатами x_{O_3} і y_{O_3} виразяться формулою:

$$R_k^2 = (2r)^2 = (b - Y_{O_2})^2 + (X_{O_3} - X_{O_2})^2. \quad (3.8)$$

Здійснивши заміну

$$c = X_{O_2}^2 + b^2 - 2bY_{O_2} + Y_{O_2}^2 - 4r^2 \quad (3.9)$$

і спростивши рівняння (6.9) будемо мати

$$X_{O_3} = X_{O_2} \pm \sqrt{-b^2 + 2bY_{O_2} - Y_{O_2}^2 + 4r^2} \quad (3.10)$$

Виразивши у рівняннях (6.6) і (6.7) R_{max} через $(D_{НОМ} + ES)/2$ отримаємо

$$X_{O_2} = \frac{b\sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta^2} + a \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta \cdot a}{D_{НОМ} + ES}; \quad (3.11)$$

$$Y_{O_2} = \frac{-a\sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta^2} + b \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta \cdot b}{D_{НОМ} + ES}. \quad (3.12)$$

Підставивши (6.11) і (6.12) у рівняння (6.10) після спрощення будемо мати

$$X_{O_3} = \frac{b\sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta^2} + a \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta \cdot a}{D_{НОМ} + ES} + \sqrt{-b^2 + 2 \cdot b \left(\frac{b \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta \cdot b - a\sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{НОМ} + ES) - \delta^2}}{D_{НОМ} + ES} \right)} \quad (3.13)$$

$$-\sqrt{\left(\frac{b \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta \cdot b - a \sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta^2}}{D_{\text{НОМ}} + ES}\right)^2 + 4r^2}.$$

Оскільки $\Delta = XO_3 - (a + 2r)$, то

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{b \sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta^2} + a \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta \cdot a}{D_{\text{НОМ}} + ES} + \\ & + \sqrt{-b^2 + 2 \cdot b \left(\frac{b \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta \cdot b - a \sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta^2}}{D_{\text{НОМ}} + ES} \right) -} \\ & - \sqrt{\left(\frac{b \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta \cdot b - a \sqrt{2 \cdot \delta \cdot (D_{\text{НОМ}} + ES) - \delta^2}}{D_{\text{НОМ}} + ES} \right)^2 + 4r^2} - (a + 2r). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Отримана залежність дозволяє визначити відстань між упорними і регулювальними гвинтами розточувальної головки, що забезпечить рух вершин різальних елементів в межах заданого поля допуску, тобто задану точність оброблення внутрішньої циліндричної поверхні отвору.

Для побудови графічних залежностей значення Δ від номінального діаметра D оброблюваної заготовки для різних квалітетів точності прийнято наступні значення конструктивних параметрів розточувальної головки $a=D/10$; $b_1=D/4$; $b_2=7D/16$; $r=6$.

Таблиця 3.1 – Значення величини Δ для 7 квалітету

інтервал номінальних розмірів, мм	Граничні відхилення полів допусків та відповідне їх значення Δ							
	P7		Js7		H7		D7	
50	-0,021	0,428	+0,015		+0,030	0,429	+0,130	0,429
80	-0,051	0,542	-0,015		0	0,543	+0,100	0,543
80	-0,024	0,585	+0,017		+0,035	0,586	+0,155	0,586
120	-0,059	0,717	-0,017		0	0,717	+0,120	0,718
120	-0,028	0,766	+0,020		+0,040	0,766	+0,185	0,767
180	-0,068	0,938	-0,020		0	0,938	+0,145	0,939
180	-0,033	1,005	+0,023		+0,046	1,005	+0,216	1,006
250	-0,079	1,184	-0,023		0	1,184	+0,170	1,185
250	-0,036	1,258	+0,026		+0,052	1,258	+0,242	1,259
315	-0,088	1,411	-0,026		0	1,411	+0,190	1,412
315	-0,041	1,476	+0,028		+0,057	1,477	+0,267	1,477
400	-0,098	1,662	-0,028		0	1,663	+0,210	1,663
400	-0,045	1,746	+0,031		+0,063	1,746	+0,293	1,747
500	-0,0108	1,951	-0,031		0	1,951	+0,230	1,951

інтервал номінальних розмірів, мм	Граничні відхилення полів допусків та відповідне їх значення Δ							
	H6	Δ , мм	H7	Δ , мм	H8	Δ , мм	H9	Δ , мм
50	+0,019	0,342	+0,030	0,428	+0,046	0,529	+0,074	0,668
80	0	0,433	0	0,542	0	0,670	0	0,847
80	+0,022	0,465	+0,035	0,585	+0,054	0,725	+0,087	0,917
120	0	0,570	0	0,717	0	0,888	0	1,124
120	+0,025	0,607	+0,040	0,766	+0,063	0,959	+0,100	1,203
180	0	0,744	0	0,938	0	1,174	0	1,473

180	+ 0,029	0,800	+ 0,046	1,005	+ 0,072	1,254	+ 0,115	1,577
250	0	0,943	0	1,184	0	1,477	0	1,858
250	+ 0,032	0,990	+ 0,052	1,258	+ 0,081	1,565	+ 0,130	1,972
315	0	1,111	0	1,411	0	1,755	0	2,212
315	+ 0,036	1,177	+ 0,057	1,477	+ 0,089	1,838	+ 0,140	2,294
400	0	1,326	0	1,662	0	2,069	0	2,581
400	+ 0,040	1,396	+ 0,063	1,746	+ 0,097	2,158	+ 0,155	2,712
500	0	1,560	0	1,950	0	2,410	0	3,027

За даними розрахунків побудовано графічні залежності (рис. 6.3). Величина Δ залежить від величини поля допуску і не залежить від його розміщення.

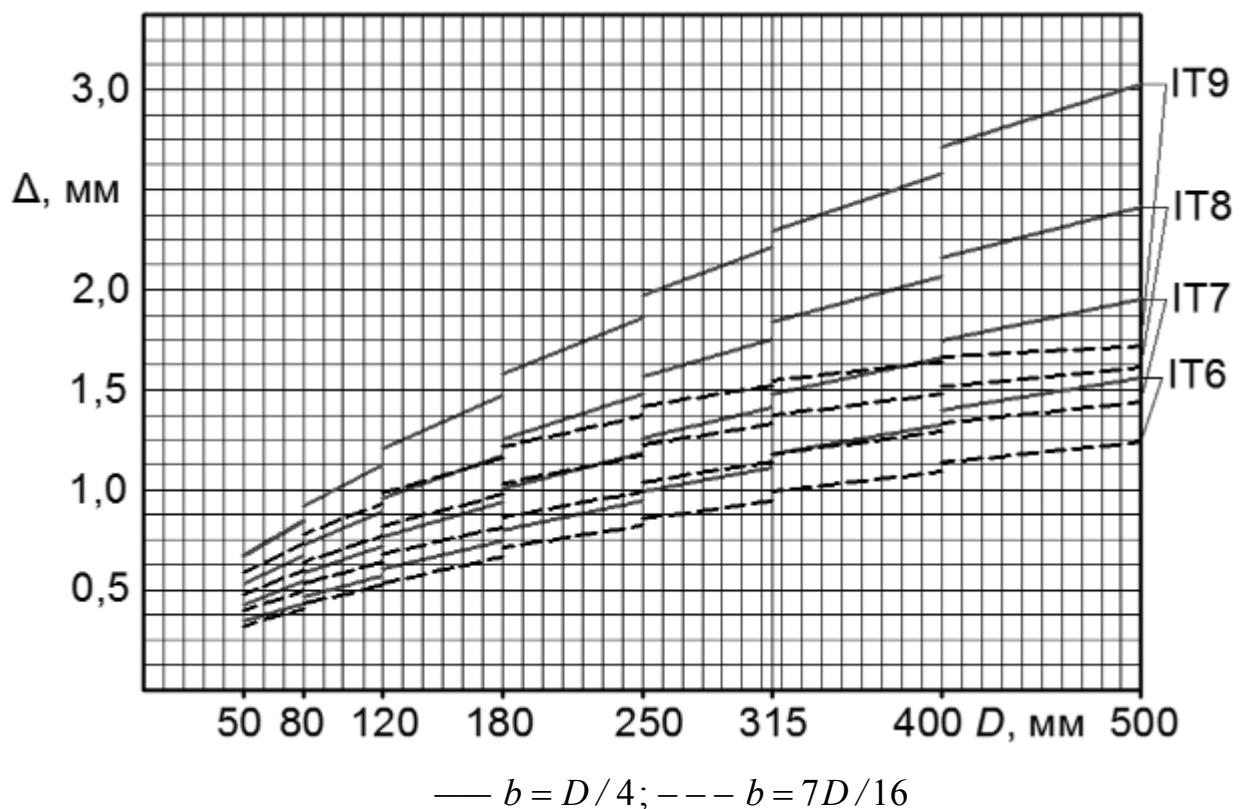


Рисунок 3.3 – Графіки залежності величини Δ від номінального діаметра D внутрішньої циліндричної поверхні оброблюваних отворів при $a = D/10$ та різних квалітетів точності

Після налагодження головки її знімають з оправки. На оправку, яка закріплена у різцетримачі верстата спочатку встановлюють заготовку у вигляді труби. Потім з'єднують головку із оправкою за допомогою різцевої поверхні 27 (рис. 6.3) базуючи по конічній поверхні 29. Після чого заготовку трубу встановлюють у спеціальний кулачковий патрон, встановлюють її і закріплюють.

Налагоджена головка працює наступним чином. Включають обертовий рух заготовки D_r і подачу головки D_s . При однакових осьових складових сил різання, що виникають в процесі різання на першому і другому різальних елементах, тобто $P_{x1}=P_{x2}$, рівноплечий важіль 10 знаходиться статичному нерухомому положенні відносно своєї осі, тобто у рівновазі.

У випадку, коли рівновага порушується, тобто $P_{x1} \neq P_{x2}$, і наприклад, $P_{x1} > P_{x2}$ і коли на різальному елементі 9 (рис. 6.1) сила P_x більша ніж на різальному елементі 19 важіль 10 повертається проти годинникової стрілки, зменшуючи при цьому подачу на різальний елемент 9 і одночасно збільшуючи подачу на різальний елемент 19, забезпечуючи при цьому умову рівноваги $P_{x1} = P_{x2}$.

Якщо ж осьова складова сили різання на другому різці 19 – P_{x2} виявиться більшою ніж P_{x1} , то поворотом рівноплечого важеля у протилежному напрямі забезпечиться умова $P_{x1} = P_{x2}$. Пружні демпфери 7 і 21 гасять коливання осьових складових сил, особливо на етапах вривання і виходу із контакту різців з оброблювальною поверхнею. Якщо, наприклад, різальний елемент 9 відхилився на таку величину, при якій умова рівноваги не може бути забезпечена, рівноплечий важіль 10 повернеться проти годинникової стрілки на певний кут і при цьому вибирається зазор між сферичними поверхнями упорного ступінчастого гвинта 26 і регульовального гвинта 17 і тоді адаптивна головка працюватиме як головка із жорстко закріпленими різцями, забезпечуючи при цьому задану точність. Аналогічна ситуація буде мати місце, коли осьова складова сили різання на різальному елементі 19 буде більша ніж на різальному елементі 9, тобто $P_{x1} < P_{x2}$.

Таким чином, запропонована прогресивна дворіцева адаптивна розточувальна головка забезпечує спрощене налаштування на заданий розмір певного квалітету та можливість використання багатогранних твёрдосплавних пластин, а в певних умовах дозволяє не втрачати своєї працездатності і працювати як інструмент із жорстко закріпленими різцями, що підвищує надійність роботи.

3.2 Конструювання нових конструкцій адаптивних розточувальних головок

Дворіцева розточувальна головка (рис. 6.13) складається з корпусу 1, в якому з можливістю регулювання положення встановлені два діаметрально-протилежні різці 2 і 3. Корпус 1 має вигляд кронштейна з хвостовиком 4 з однієї сторони і U-подібними бічними поверхнями 5 і 6 паралельними осі хвостовика 4 – з іншої. Різці 2 і 3 закріплені на рівноплечому важелі 7, який встановлений з можливістю повороту на осі 8 у вигляді спеціального болта. Вісь 8 розміщена у співвісних отворах 9 і 10 виконаних на U-подібних бічних поверхнях 5 і 6 і зафіксована від осьового переміщення гайкою 11. В корпусі 1 в діаметрально-протилежних напрямках, паралельно U-подібним бічним поверхням 5 і 6 навпроти рівноплечого важеля 7 виконано два отвори 12 і 13, в яких розміщені упорні гвинти 14 і 15. Довжина упорних гвинтів більша довжини отворів 12 і 13. Упорні гвинти 14 і 15 з сторони хвостовика 4 зафіксовані від осьового переміщення гайками 16 і 17. Вільні кінці 18 і 19 упорних гвинтів 14 і 15 виступає з корпусу 1 з сторони U-подібних бічних поверхонь таким чином, що забезпечується коливний рух рівноплечого важеля 7 з зазором $\Delta_{важ}$. Цей зазор визначається за формулою:

$$\Delta_{важ} = l_{важ} \cdot tg(\alpha_{важ}) + R_{важ} \left(\frac{1}{\sin(90 - \alpha_{важ})} - 1 \right), \text{ мм}, \quad (6.48 \text{ 3.15})$$

де $l_{важ}$ – відстань від осі обертання рівноплечого важеля, мм;

$\alpha_{важ}$ – кут повороту рівноплечого важеля, град.

$$\alpha_{важ} = \arccos\left(\frac{R_{важ} - a_{доп}}{r_{зв}}\right), \quad (3.16)$$

де $R_{важ}$ – відстань від осі обертання рівноплечого важеля до центра радіуса вершини різця, мм;

$a_{доп}$ – допуск на оброблюваний розмір, мм;

$r_{зв}$ – радіус основи упорного гвинта, мм.

Також похила поверхня 20 корпусу 1 з сторони вільних кінців 18 і 19 упорних гвинтів 14 і 15 є у взаємодії з резиновим ущільненням 21 і 22. З іншої сторони резинові ущільнення 21 і 22 є у взаємодії з поверхнею рівноплечого важеля 7, які гасять коливання рівноплечого важеля під час роботи. Резинові ущільнення 21 і 22 від переміщення зафіксовані накладною гайкою 23 і упорним кільцем 24, які своїми внутрішніми поверхнями 25 і 26 загвинчені на зовнішню поверхню 27 корпусу 1.

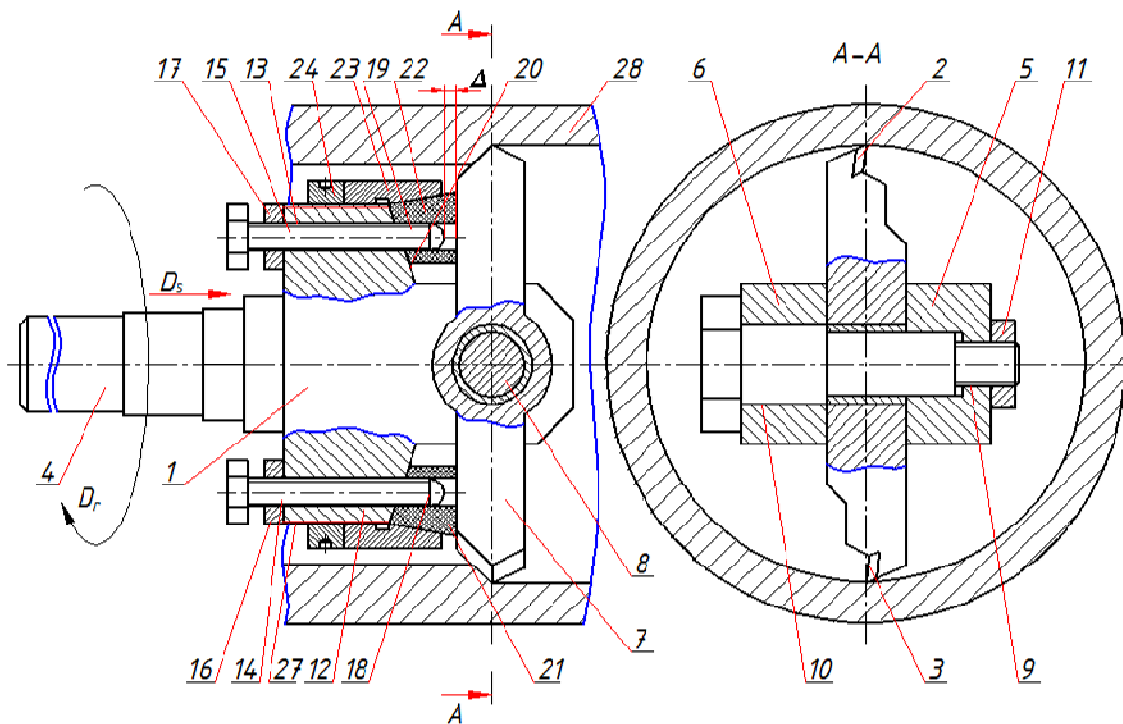


Рисунок 6.13 – Схема адаптивної дворізевої розточувальної головки

Дворіздева розточувальна головка працює наступним чином. Дворіздеву розточувальну головку використавши хвостовик 4 відгвинчують з оправки (на фіг. не показано). На оправку встановлюють заготовку 28, закручують хвостовик 4 у оправці, а заготовку 28 у пристрої встановленому на патроні (на фіг. не показано), включають головний рух D_r , обертання заготовки і рух подачі D_s супорта справа наліво і здійснюють розточування.

Під час роботи дворіздевої розточної головки руйнування стружки здійснюється забезпеченням коливного руху рівноплечого важеля 7. Разом з тим для забезпечення вказаного допуску на розмір коливання рівноплечого важеля 7 не повинно перевищувати кута α , який отримують зміщенням упорних гвинтів 14 і 15 на величину $\Delta_{важ}$.

Таким чином, запропонована дворіздева розточувальна головка забезпечує відсутність відхилення від прямолінійності осі оброблюваного отвору, а також зменшення шорсткості обробки.

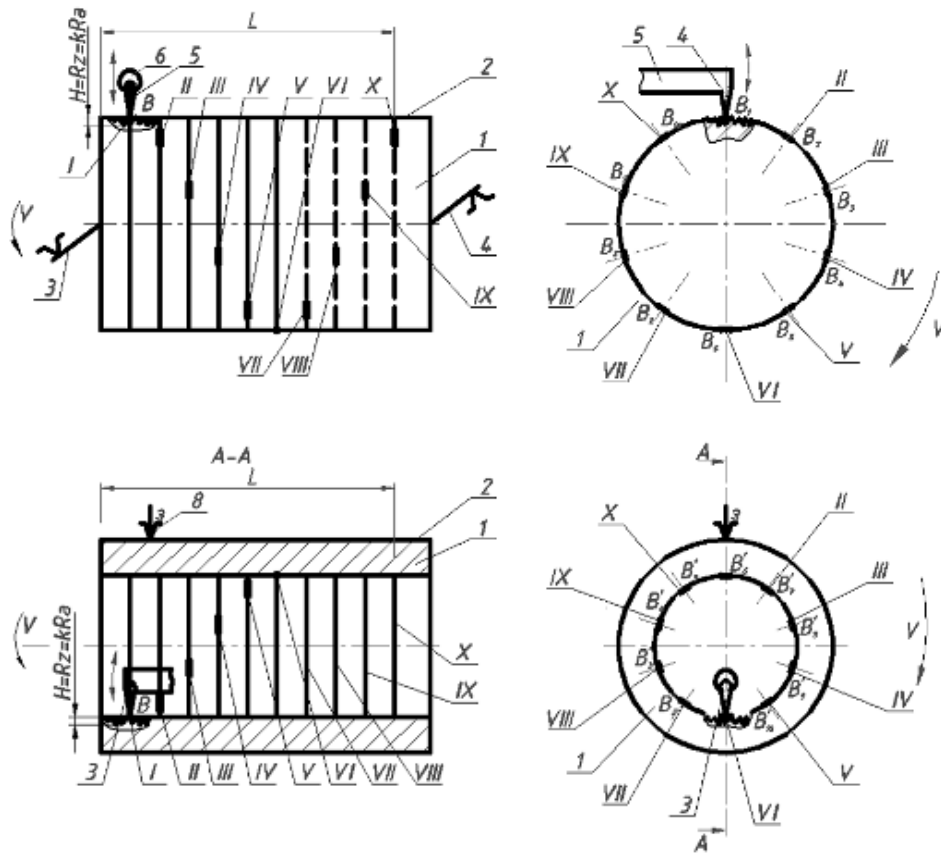
3.3 Спосіб вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь

Існуючі способи вимірювання шорсткості поверхні мають ряд недоліків. Недоліком відомих способів вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь є неврахування стохастичного характеру параметра шорсткості R_a і те, що при цьому за результат приймають середнє значення, а також не враховують того, що у циліндричних поверхнях сформованих волочінням, калібруванням у фільєрах, протягуванням і дернуванням сліди оброблення паралельні твірній циліндричної поверхні і її повздовжній осі і при цьому як результат отримують занижений результат.

Метою даного дослідження є створення способу вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь, сліди оброблення яких паралельні твірній цих поверхонь, який би враховував стохастичний характер мікронерівностей, напрям їх розміщення і забезпечував би високу достовірність отриманих результатів.

Запропонований спосіб реалізується наступним чином. Циліндричну деталь 1 із зовнішньою циліндричною поверхнею 2 вільно встановлюють, наприклад, у передній центр 3 і підтискують заднім центром 4. В задану найвищу верхню точку B_1 зовнішньої циліндричної поверхні 2, наприклад I (першої) траси, встановлюють голку 5 профілометра, яка закріплена на штокові 6. Включають профілометр і обертання заготовки, забезпечуючи при цьому таку лінійну швидкість обертання циліндричної поверхні заготовки, яка дорівнює встановленій приладом заданій швидкості V прямолінійного переміщення голки, що забезпечується профілометром, тобто забезпечують частоту n обертання заготовки, яка дорівнює $n = V / \pi D$, де D – діаметр досліджуваної циліндричної поверхні і при цьому забезпечують кут ψ повороту цієї поверхні який не менше $\psi \geq 360^\circ \cdot L_{\text{тр}} / \pi D$, де $L_{\text{тр}}$ – довжина траси вимірювання, яка використовується для вимірювання нерівностей, що характеризують шорсткість поверхні. Так як сліди мікронерівностей паралельні твірній зовнішньої циліндричної поверхні, то голка профілометра проковзуючи по цих мікронерівностях і ощупуючи їх буде знаходитись у коливному русі і дозволить приладу зафіксувати значення середнього арифметичного відхилення профілю R_a . Після цього голку піднімають вгору і забезпечують при цьому відсутність її контакту з досліджуваною циліндричною поверхнею і голку разом з профілометром переміщують вздовж повздовжній осі деталі на один крок $t = L_\partial / i$, де L_∂ – певна довжина досліджуваної поверхні, а заготовку повертають у протилежному напрямі на кут $\omega = \psi - 360 / i = 360^\circ \left(\frac{L_{\text{тр}}}{\pi D} - \frac{1}{i} \right)$, потім голку встановлюють у найвищій точці B_2 досліджуваної циліндричної поверхні і повторюють вищеписаний прийом здійснюючи вимірювання на II трасі.

Аналогічно здійснюють вимірювання на інших III-X трасах, отримують 10 значень середнього арифметичного відхилення профілю $R_{a1}, R_{a2} \dots R_{a10}$, які приймають як випадкові величини з нормальним законом розподілу.



а)



б)

а) схема реалізації; б) практичне виконання

Рисунок 6.14. Виконання способу вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь [228]

Використовують теорію малої вибірки, зокрема метод ітерацій і визначають математичне сподівання $M(R_a)$ і вибірккову дисперсію $D(R_a)$ і

знаходять максимальне значення параметра шорсткості $R_{a\max}$ за формулою $R_{a\max} = M(R_a) + 3\sqrt{D(R_a)}$, яке приймають за істинне значення.

У випадку вимірювання шорсткості внутрішньої циліндричної поверхні вище згадані прийоми повторюють з різницею у тому, що циліндричну пустотілу деталь 7 закріплюють, наприклад, у трьохкулачковому патроні 8, а голку 5 встановлюють у найнижче розміщених точках $B_1 \dots B_{10}$ внутрішньої циліндричної поверхні на I, II, III...X трасах. Аналогічно повторюють прийоми описані вище і отримують статистичний ряд значень $R_{a1}, R_{a2} \dots R_{a10}$, які піддають статистичному обробленню і отримують математичне сподівання $M(R_a)$, вибіркочну дисперсію $D(R_a)$ і максимальне значення середнього арифметичного відхилення профілю $R_{a\max} = M(R_a) + 3\sqrt{D(R_a)}$.

Вимірювання шорсткості зовнішньої циліндричної поверхні отриманої чистовим точінням здійснювалось з використанням профілометра моделі 296.

Діаметр досліджуваної циліндричної поверхні $D=12$ мм, а її довжина $L = 50$ мм. Швидкість переміщення голки профілометра моделі 296 $V=60$ мм/хв. За даними паспорта профілометра довжина траси вимірювання $L_{\text{тр}} = 6$ мм, а відсік кроку – довжина базової лінії $l=2,5$ мм.

Визначають частоту обертання вимірювальної деталі $n = V / \pi D = 60 / 3,14 \cdot 12 = 1,59$ об/хв.

Визначають кут повороту ψ вимірюваної деталі

$$\psi \geq 360 \cdot L_{\text{тр}} / \pi \cdot D = 360^\circ \cdot 6 / 3,14 \cdot 12 = 57,32^\circ.$$

Здійснюють вимірювання параметра шорсткості R_{a1} на першій трасі $R_{a1} = 0,68$ мкм. Голку виводять із контакту із досліджуваною поверхнею деталі і її повертають у протилежному напрямі на кут

$$\psi = 360^\circ \cdot \left(\frac{L_{\text{тр}}}{\pi \cdot D} - \frac{1}{i} \right) = 360^\circ \cdot \left(\frac{6}{3,14 \cdot 12} - 0,1 \right) = 21,32^\circ \text{ мм.}$$

У подальшому голку з профілометром переміщують вздовж осі деталі на крок $t = 5$ мм та доводять до контакту з досліджуваною поверхнею, повертають

заготовку з частотою 1,59 об/хв. на кут $\varphi = 57,12^\circ$ і отримують значення параметра шорсткості на II трасі $R_{a2} = 0,7$ мкм.

Таблиця 6.3 – Значення параметра шорсткості на розміщених по довжині деталі і по куту її повороту трасах

№ траси	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
R_{ai} , мкм	3,00	3,14	3,90	3,60	3,59	3,65	3,17	3,47	3,51	3,11

Повторюють вищеописані прийоми на всіх інших трасах і отримують значення R_{ai} , які подані у таблиці 6.3.

Математичне сподівання $M(R_a)$ і вибіркочну дисперсію $D(R_a)$ для вибірки обсягом 10 значень визначають за методом ітерацій за теорією малої вибірки скориставшись формулами

$$M(R_a) = \frac{a+b}{2} \prod_{k=1}^n c_k + \sum_{k=1}^n \prod_{k=1}^n c_k \left\{ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{z_{1k}^2}{2}} - e^{-\frac{z_{2k}^2}{2}} \right) + r_{ak} [\Phi(z_{2k}) - \Phi(z_{1k})] \right\} \quad (3.17)$$

де k – кількість значень у вибірці;

$c_k (k = 1, \bar{n})$ – стала величина, яка дорівнює

$$c_k = \frac{1}{1 + \Phi\left(\frac{b - r_{ak1}}{\sigma_a}\right) - \Phi\left(\frac{a - r_{ak1}}{\sigma_a}\right)}, \quad (3.18)$$

$\sigma = \frac{b-a}{6}$ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини R_a ;

$z_{1k} = \frac{a - r_{ak}}{\sigma}$ і $z_{2k} = \frac{b - r_{ak}}{\sigma}$ – межі інтегрування для випадкової величини

R_a ;

$[a; b]$ – проміжок зміни величини R_a вважається відомим і таким, що $a = r_{K_{\min}}$, $b = r_{K_{\max}}$ ($r_{K_{\min}}$ і $r_{K_{\max}}$ – відповідно найменше і найбільше значення серед середніх арифметичних відхилень профілюю $r_k (k=1, \bar{n})$ експериментальних даних випадкової величини R_a ;

$\Phi(z_{1k})$, $\Phi(z_{2k})$ – функції Лапласа для випадкової величини R_{asq}

$$D(R_{asq}) = \frac{a_1^2 + a_1 \cdot b_1 + b_1^2}{3} \prod_{k=1}^n C_{ak} + \sum_{i=1}^n C_k \left\{ \frac{\sigma_a}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{\sigma_a}{\sqrt{2\pi}} (\sigma \cdot z_{1k} + 2 \cdot r_k) \cdot e^{-\frac{z_{1k}^2}{2}} - (\sigma_a \cdot z_{2k} + 2 \cdot r_k) \cdot e^{-\frac{z_{2k}^2}{2}} \right] + (\sigma_a^2 + r_q^2) \right\} \times$$

$$\times \prod_{k=1}^n C_k + \sum_{i=1}^n C_k \left\{ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[-(\sigma \cdot z_{2k} + 2 \cdot t_{1k}) \cdot e^{-\frac{z_{2k}^2}{2}} \right] + (\sigma^2 + r_2^2) \right\} \quad (3.19)$$

Середнє квадратичне відхилення у цьому випадку буде дорівнювати

$$\sigma(R_{asq}) = \sqrt{D(R_{asq})} \quad (3.20)$$

Для даного випадку вибіркоче математичне сподівання визначене за формулою (2.38) становило $M(R_a) = 1,195$ (мкм), а середнє квадратичне відхилення $\sigma(R_a) = 0,217$ (мкм).

Співвідношення між $R_{a \max}$ і $M(R_a)$ становлять $\frac{R_{a \max}}{M(R_a)} \approx 1,195\%$, а

відносна похибка δ у відсотках складе:

$$\delta = \frac{R_{a \max} - M(R_a)}{M(R_a)} \cdot 100\% = \frac{3,993 - 3,342}{3,342} \cdot 100\% \approx 19,5\%$$

що вказує на суттєву відмінність між $M(R_a)$ і $R_{a \max}$.

Отримані дані підтверджують необхідність визначати максимальне значення $R_{a \max}$ і приймати його як істинне значення.

Таким чином, запропонований спосіб вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь забезпечує високу достовірність отриманих результатів.

РОЗДІЛ 4

ФРАКТОДІАГНОСТУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКА КОЛИВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ МАШИНИ БЕЗПЕРЕВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

4.1. Аналіз впливу умов роботи обладнання на умови його зношування

В рамках підходу фізичної мезомеханіки проблема зношування традиційно займала особливе місце, оскільки при його розгляді необхідно одночасно і на різних масштабних рівнях розглядати процеси пластичної деформації, руйнування та видалення частинок зношеного матеріалу із зони трібоконтракту [273-275]. Крім механічних проблем, при цьому слід враховувати аспекти істотної зміни властивостей матеріалів в плямах контакту (де внаслідок локального розігріву температура може сягати кількох сотень градусів), процеси хімічних перетворень, що виникають за різних механізмів зношування (адгезійному, окислювальному, втомному, абразивному і ін.). Отже, для адекватного розуміння і опису розроблено спрощені моделі, які переважно враховують експериментальні закономірності [276-285].

За такого розгляду, аналіз процесів, що виникають в реальних трибосопряженнях, не завжди відповідає фундаментальних проблемам, що вивчає фізична мезомеханіка. Однак, використання багаторівневого підходу, виділення масштабних / структурних рівнів деформування і руйнування, в поєднанні з аналізом характерних дефектів та пошкоджень, на думку авторів створює можливість використання мезомеханічного підходу до феноменологічного опису процесів, що зумовили вихід з ладу реального вузла промислової конструкції.

Автори усвідомлюють, що запропонований розгляд є дещо спрощеним, проте, він загалом узгоджується з існуючими теоріями тертя, а також підтверджується експериментальними даними. Крім того, в подальшому, при належному розвитку і використанні чисельних методів, запропонована фізико-

механічна інтерпретація процесів зношування може бути трансформована в методику розрахунку, або технічної діагностики підшипникових вузлів.

Розглянемо умови експлуатації шарнірно-важільного коливального механізму кристалізатора сортової радіальної МБЛЗ, загальний вигляд якого подано на рис. 4.1. Крутний момент від двигуна 1 через з'єднувальну муфту 2 передається на понижуючий редуктор 3. Електродвигун і редуктор встановлені на загальній незалежній коливній платформі. Тихохідний вал редуктора, що має швидкість обертання 400 об/хв., з'єднано з валом у підшипникових опорах 5, на якому встановлено ексцентрикову муфту 4. Дана муфта дозволяє регулювати ексцентриситет валу, виконуючи за рахунок цього роль кривошипу важільного коливального механізму. В опорах 6 шарнірно закріплено нижні коромисла 7, а в опорах 8 – верхні коромисла 9. Нерухомі шарнірні опори 6 і 8 розташовано в єдиній основі коливального механізму. Її встановлено та закріплено на тримках металокопонування МБЛЗ.

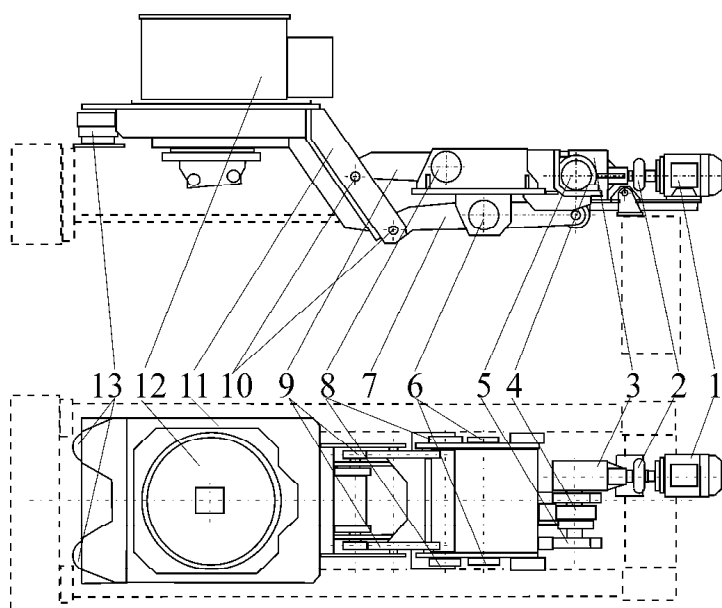


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд шарнірно-важільного коливного механізму кристалізатора МБЛЗ з електромеханічним приводом

У якості опор використано дворядні роликові (сферичні або циліндричні) підшипники, які централизовано змащуються оливою Mobilux EP 0. За допомогою шарнірних вузлів 10 коромисла 7 і 9 з'єднано зі коливним столом

11, на якому встановлено кристалізатор 12. Коромисла 7 і 9 встановлено так, що прямі, проведені через них, спрямовано в бік центру кривизни МБЛЗ, внаслідок чого забезпечено плоско-паралельний рух коливального стола 11 в повздовжній площині до технологічної осі струмка машини за траєкторією, що відповідає дузі кола з радіусом, що дорівнює базовому радіусу МБЛЗ.

Коливальний стіл, з протилежного від приводу коливального механізму боку, спирається на пневматичні амортизатори 13, які зрівноважують сили тяжіння коливального стола і кристалізатора, а також технологічного навантажування, зумовленого зусиллям витягування безперервного злитка з кристалізатора. Підшипники опор 6 і 8 нижнього 7 і верхнього 9 важилів коливного механізму, а також підшипники шарнірів 10, які з'єднують ці важилі зі коливальним столом 11 працюють у режимі коливального руху, за якого тіла кочення не перекочуються вздовж бігових доріжок кілець підшипників, а коливаються на одному місці.

При цьому зовнішнє і внутрішнє кільця підшипників повертаються відносно одне відносно одного приблизно на 1° , тобто виконує зворотно-коливальні рухи. Посадка підшипників – перехідна по зовнішньому кільцю і натягом по внутрішньому. Умови роботи підшипникових вузлів важкі, їм притаманні підвищена температура і вологість оточуючого середовища, а також можливістю паро- пилоутворення у місці встановлення коливного механізму. Досліджували механізми та причини зношення підшипників коливального механізму кристалізатора сортової радіальної МБЛЗ на основі фрактодіагностування.

У підшипнику є два ряди роликів. Вони переміщуються по внутрішній і зовнішній доріжках кочення і нахилені під кутом до осі підшипника. Його конструкція забезпечує функції самовирівнювання, нечутливість до порушень співвісності, нечутливість до значних радіальних та осьових навантажень. Для аналізу інформації про механізми зношування проводили профілометричний, оптичний та фактографічний аналіз пошкоджених ділянок.

4.2. Комплексне оцінювання пошкоджень поверхонь підшипника коливального механізму МБЛЗ

Профілографія. Форму та розташування дефектів підшипника оцінювали за показниками відхилень від круглості її опорної поверхні. Для цього, за допомогою кругломіра моделі 289 вимірювали відхилення від круглості по довжині її опорної поверхні в 35-ти поперечних перерізах (рис. 7.1, а-г). При цьому, опорну поверхню вкривали рівномірною сіткою перетинів, в яких визначали відхилення радіальної координати внутрішньої циліндричної поверхні. Це дозволило оцінити похибки форми кільця в тангенціальному та аксіальному напрямках підшипника.

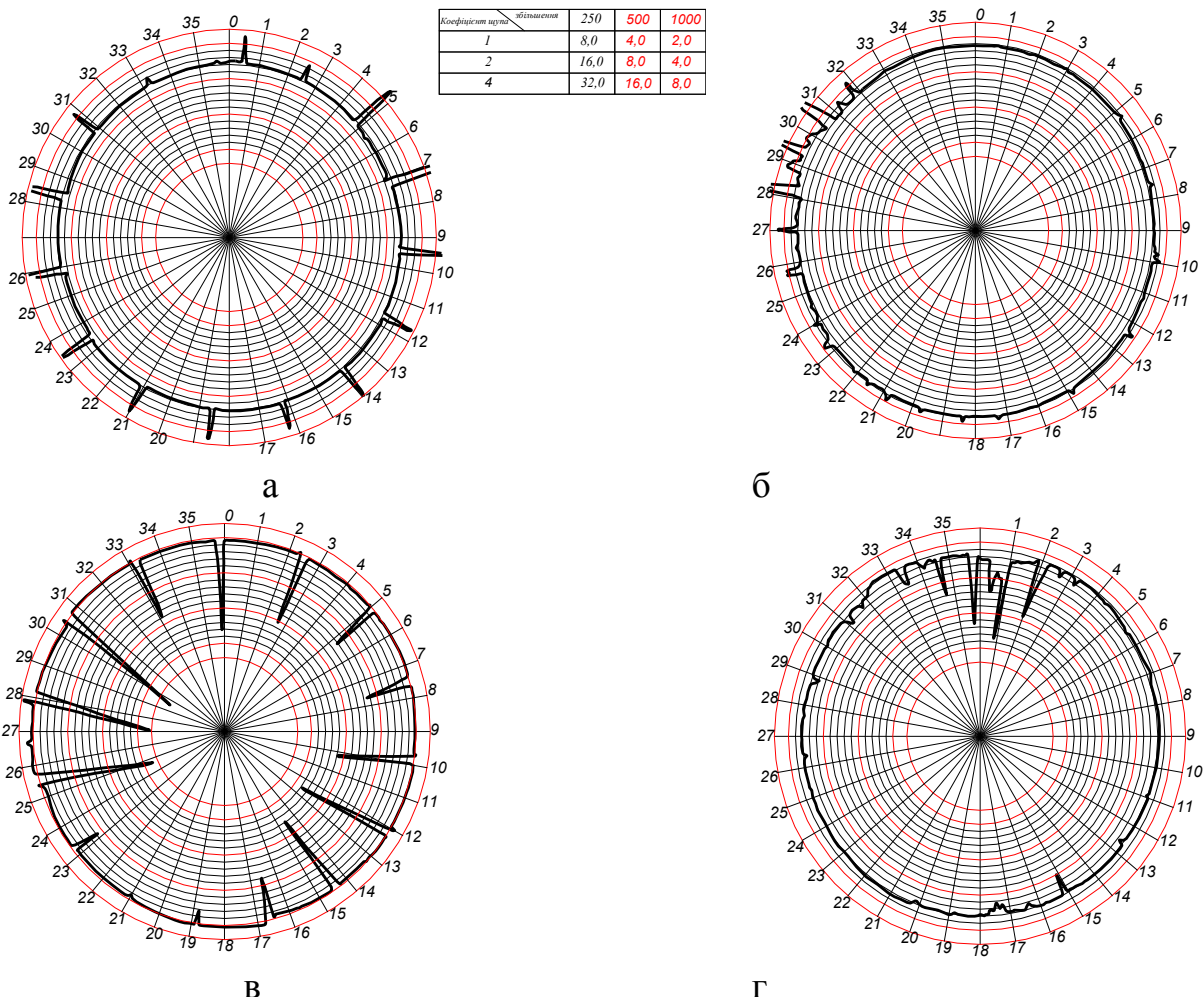


Рисунок 4.2 – Круглограма внутрішнього (а, б) та зовнішнього (в, г) кілець підшипника

Оскільки якість поверхні кілець підшипника визначає динамічний стан коливачь механізму, вимірювали профілограму (круглограму) зовнішнього та внутрішнього кілець підшипника. Виявлено систему коливачь профілю, які суттєво впливають на некруглість, хвилястість робочої поверхні, а також чітко відображає структуру дефектів кільця.

На основі розгляду круглограми можна зробити низку висновків:

- пошкодження поверхні мають складну просторову структуру, яку, у першому наближенні, можна розглядати як характеристику стохастичних коливачь робочого механізму;

- структура запису пікоподібних нерівностей визначає просторову структуру дефектів обох доріжок кільця підшипника та встановлює їх взаємозв'язок із кроком роликів;

- виявлено відмінності структури дефектів різних доріжок підшипника, що свідчить про нерівномірність їх навантажування, тобто нерівномірність перерозподілу навантажень у процесі роботи;

Оптичний мікроаналіз поверхні ділянок локалізованого пошкодження.

Відомо, що зазвичай одне з кілець підшипників (як правило зовнішнє) встановлюється нерухомо, і інше є обертовим, рис. 4.3а,б. З енергетичної точки зору воно є веденим. Ці обставини як правило, не враховують при аналізі умов навантажування на ділянках контакту роликів із поверхнями зовнішнього та внутрішнього кілець. Оскільки одна з деталей підшипника залишається нерухомою відносно напрямку навантажування, форма зношених ділянок має трапецевидну форму, рис. 4.3в,г.

Пляма контакту. Плями контакту є неоднорідними по ширині кілець підшипника, свідчить про імпульсність (динамічність) навантаження, помилки монтажу, або перевантаження конструкції. Такі види навантажень заважають повертатись кільцям підшипника, спричиняючи незначні переміщення між тілами кочення та поверхнею кілець. Це спричиняє виникнення поверхневих заглиблень, рис. 4.4а.

Слід відзначити, що напрям динамічного впливу значно впливає на тертя та зношування. Наявність вібраційного впливу змінює напружено-деформований стан у зоні контакту. Плями наявні на доріжках кочення обох кілець, а відстань між ними відповідає відстані між роликками. Поверхня плям містить сліди зношування і вкрита боріздками, подряпинами що є додатковим свідченнями проковзування роликків, рис. 4.4б. Зовнішній вигляд плям зношування має світлий колір, «металевий» блиск.



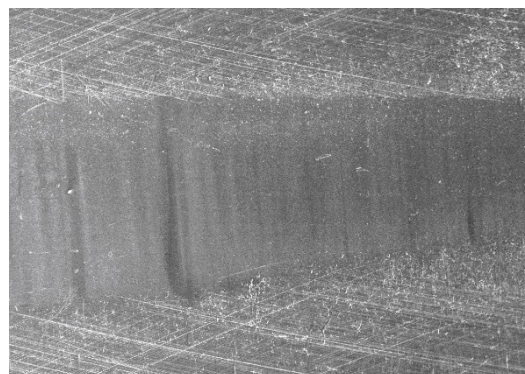
а



б



в

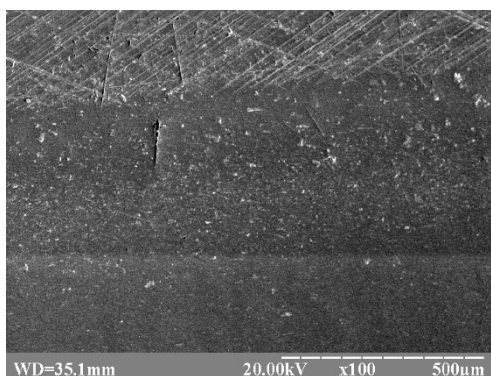


г

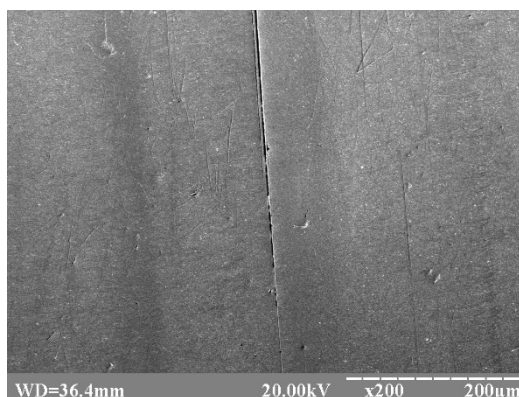
Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд підшипника (а), типові пошкодження зовнішнього кільця (б) та оптичне (в) і РЕМ-зображення (г) типового дефекту

Фрактографічний аналіз. За даними фрактографічного аналізу на дні «плями контакту» є сліди пластичного течіння металу у вигляді паралельних рисок значної площі, рис. 4.4в,г. Можна припустити, що це сліди пластичного деформування у зоні контакту ролик-поверхня. Крім того поверхня пошкоджена локальними, або великими подряпинами. Подряпини утворились

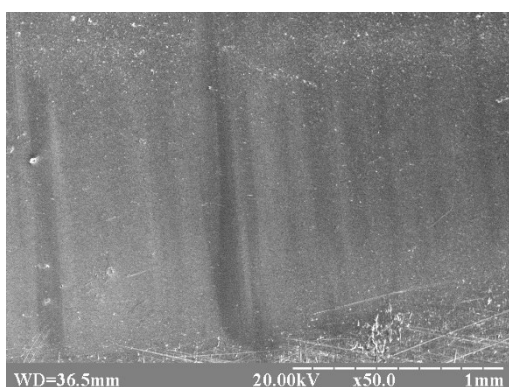
як наслідок втискання та зсуву абразивних частинок по поверхні кільця підшипника, рис. 4.4е.



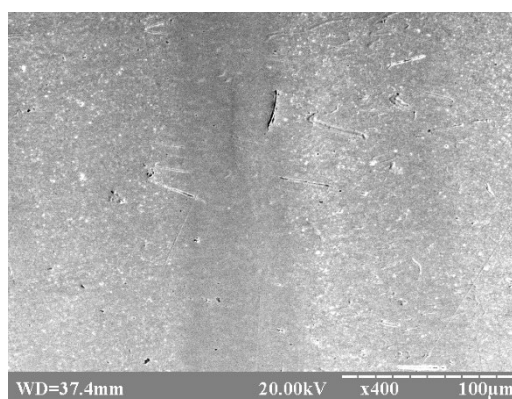
а



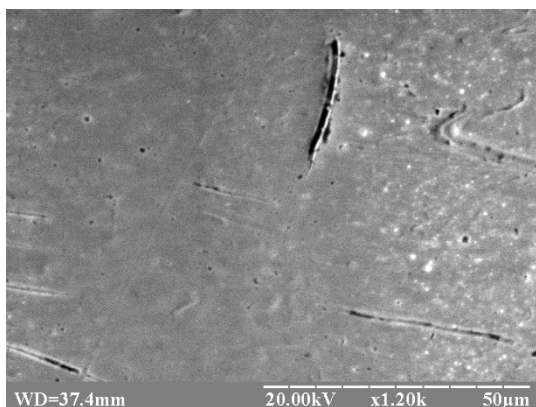
б



в



г



е

Рисунок 4.4 – Поверхня дефекту (а), подряпина (б), вм'ятини (в) та потертості (г) та мікротріщини (е)

Слід відзначити, що на поверхні «плями» можна чітко виділити характерні зони, у межах яких відбувались процеси тертя та зношування певної інтенсивності. На цих поверхнях помітні хаотично орієнтовані сліди дряпання, рис. 4.3е. Це вказує на появу додаткового (тангенціального) вектора переміщень абразивних частинок. Очевидно після втискання абразивних

частинок у поверхню вони починають проковзувати вздовж поверхні. У цьому випадку формуються ділянки гострих лінійних подряпин та слідів криволінійного дряпання.

В результаті експлуатації поверхню зовнішньої і внутрішньої обойми підшипника виявилася покрита канавками зносу, «прямокутної» і «трапецієподібної» форми. Виходячи з принципів роботи розглянутого механізму і спостережуваних дефектів, обговоримо характер його навантаження і можливі причини, що викликають появу подібних дефектів.

З позиції розгляду масштабних рівнів деформації при зношуванні підшипника періодичність виникнення концентраторів напружень такого типу слід віднести до найбільшого масштабу - МАКРО. Цей масштаб пов'язаний з квазіперіодичністю розташування канавок зносу. Поперечний переріз однієї з таких канавок представлено на рис. 4.5. Характерний розмір дефектних структур, що формуються на даному масштабі, слід оцінити як одиниці міліметрів.

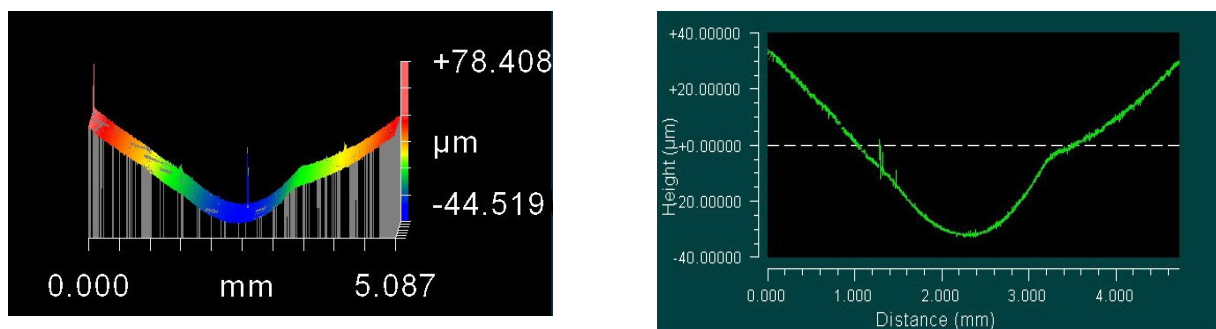


Рисунок 4.5 – Поперечні перерізи канавок зношування канавка з єдиною вершиною зношування



Рисунок 4.6 – Поперечні перерізи канавок зношування канавка з подвійною вершиною зношування

До мезрівня II розвитку деформаційних процесів слід віднести шорсткість сформовану в межах канавок. Це переважно складки, орієнтовані вздовж їх осі. Відомо, що морфологію зносу і рельєфообразования поверхні тертя можна розглядати як один з варіантів самоорганізації матеріалу і пари «тіло - контртіло» в умовах роботи конкретного механізму. Аналіз канавки за допомогою тривимірної профілометрії дозволив оцінити профіль пошкоджених ділянок. Відмінність глибини канавок на різних ділянках підшипника свідчить про багаторазовий вплив ролика на її дно, що свідчить про поетапне формування.

Розглянемо рис. 4.7 а, де показана канавка з одиничною вершиною і досить пологими стінками. Це підтверджується значеннями кутів нахилу стінок канавки: якщо у дна кут нахилу до горизонталі складає 54° , то в середньому перерізі канавки він становить $34 \dots 43^\circ$. На рис. 4.7 б, де показано канавку з подвійною вершиною, утворену внаслідок зсуву поверхні навантаженої роликом і його багаторазового прослизання на суміжну ділянку поверхні. Кут нахилу стінок канавки до горизонталі в цьому випадку становить приблизно 45° . В цілому, геометрія утворених дефектів свідчить, про те, що існує не лише просторова неоднорідність процесів зношування різних канавок, але ця неоднорідність винакає також уздовж «осі» окремо взятої канавки, а також у її перерізі.

Складний рельєф поверхні тертя вказує на факт впливу значних локальних навантажень в місцях контакту обойми і роликів підшипника (рис. 4.7 а). За великих збільшень на поверхні помітні множинні шорсткості і подряпини. Їх наявність побічно підтверджує порушення режиму змащування поверхонь (рис. 4.7 б). Характерним розміром для даного масштабного рівня слід вважати - частки міліметра, а процеси, що зумовлюють їх розвиток - локалізоване, багаторазове, циклічне навантаження роликами і невідповідність деформації поверхневого і внутрішнього шару кілець підшипника.

До мезоуровне I в даному випадку слід віднести формування

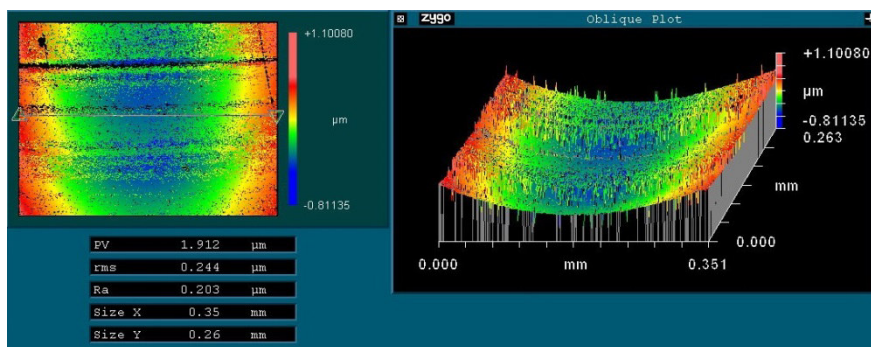
деформаційного рельєфу на дні канавок зносу з різною морфологією (перш за все, мезоскладок, орієнтованих поперек осі канавки - рис. 4.7 б). Оскільки в межах канавки розподіл навантаження теж неоднорідне, що підтверджується неоднорідністю їх профілів і різними кутами нахилу стінок, виникають неоднорідний розподіл напружень і деформацій. Відзначимо, що розподіл напружень при подібних явищах може мати квазіперіодический характер (в одновимірному випадку має синусоїдальну розподіл) [293]. За своєю природою такий розподіл подібно «шахового розподілу нормальних розтягують і стискають напруг», характерному для локалізації пластичних деформації в навантаженому тілі при пружно-пластичній деформації [294]. Це призводить до того, що на окремих ділянках поверхні (в вершинах синусоїди), навантаження будуть вище, відповідно деформації і знос там будуть більш інтенсивними. Оскільки має місце локалізація деформації на окремих ділянках канавки зносу - рис. 4.7 б (мезорівень II), там процеси руйнування і викришування частинок буде протікати найбільш активно (мезорівень I). При цьому на дні канавки помітно гофрування поверхневого шару - тонка складчастість, пов'язана з різним ступенем деформації поверхневого шару і нижчих верств серцевини, що ще раз підтверджує упорядкований характер накопичення пошкоджень на уже згадуваному ділянці [294].

Для цього масштабного рівня деформування і руйнування характерним розміром слід вважати деяке середнє відстань між поперечними мезоскладками (рис. 4.3, б). Його, в першому наближенні, можна оцінити як проце рівня від десяти до ста мікрон. Ще раз підкреслимо, що природа їх виникнення, швидше за все усталостная, або деформаційно-усталостная, оскільки формування таких мезоскладок на «вигладженою» роликот дні канавки, пов'язане з: а) локальними динамічними навантаженнями; б) циклічним характером прикладання навантаження; в) локальним нагріванням, в тому числі з причини порушення мастильного режиму.

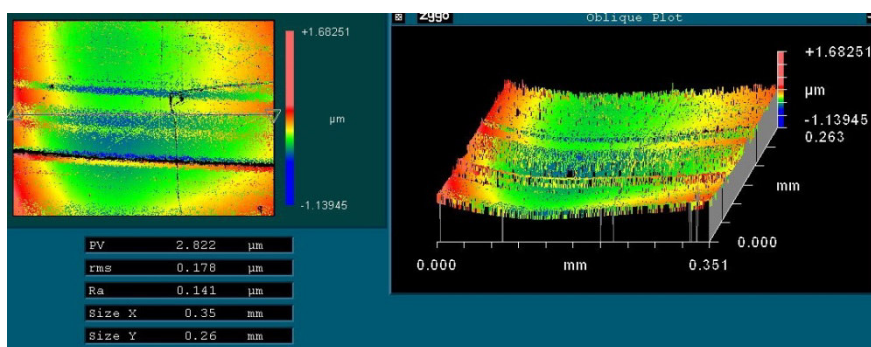
Поряд зі здатністю до зміцнення при деформуванні (зношуванні) матеріал підшипника має, очевидно, певну релаксаційну здатність, що залежить від

величини і схеми навантажування. За зміни навантаження і швидкості ковзання пластичне деформування поверхні тертя локалізоване на мікромасштабному рівні, що може забезпечувати релаксацію напружень внаслідок структурно-фазових трансформацій і фрагментації (деградації) матеріалу на поверхні тертя [292].

Розглянемо докладніше закономірності руйнування і зношування на дні канавок несправжнього брінеліровання. Складний характер останнього зумовлений складною схемою навантаження і зміною розмірів і форми плям контакту під час експлуатації. При формуванні канавки локалізується пляма контакту ролика і обойми підшипника, що збільшує контактні тиску на матеріал. Це сприяє розвитку зсувних деформацій, формуванню мікрошорсткості і вирівнюванню микронеровностей, зумовлює зниження параметру R_a в два рази, і значно згладжує рельєф (рис. 4.6, а, б; рис. 4.7, а, б, в).



а



б

Рисунок 4.7 – 3D-профілометрія дна двох різних канавок зношування несправжнього брінелювання (а, б)

Мікрорельєф поверхні досліджених канавок приблизно подібний (рис. 4,

а, б). При дослідженнях методом оптичної мікроскопії були встановлені незначні морфологічні відмінності дна різних канавок. Видно, що прилегла до канавках поверхня покрита множинними подряпинами, які сформовані твердими частинками, що утворилися в результаті видалення матеріалу з ямок зносу. Про це свідчать мікроподряпини, що виникли внаслідок проковзування гострих частинок по металевій поверхні (рис. 4.7, г), а також їх впровадження, що неможливо при наявності в даній зоні достатньої кількості мастильного матеріалу.

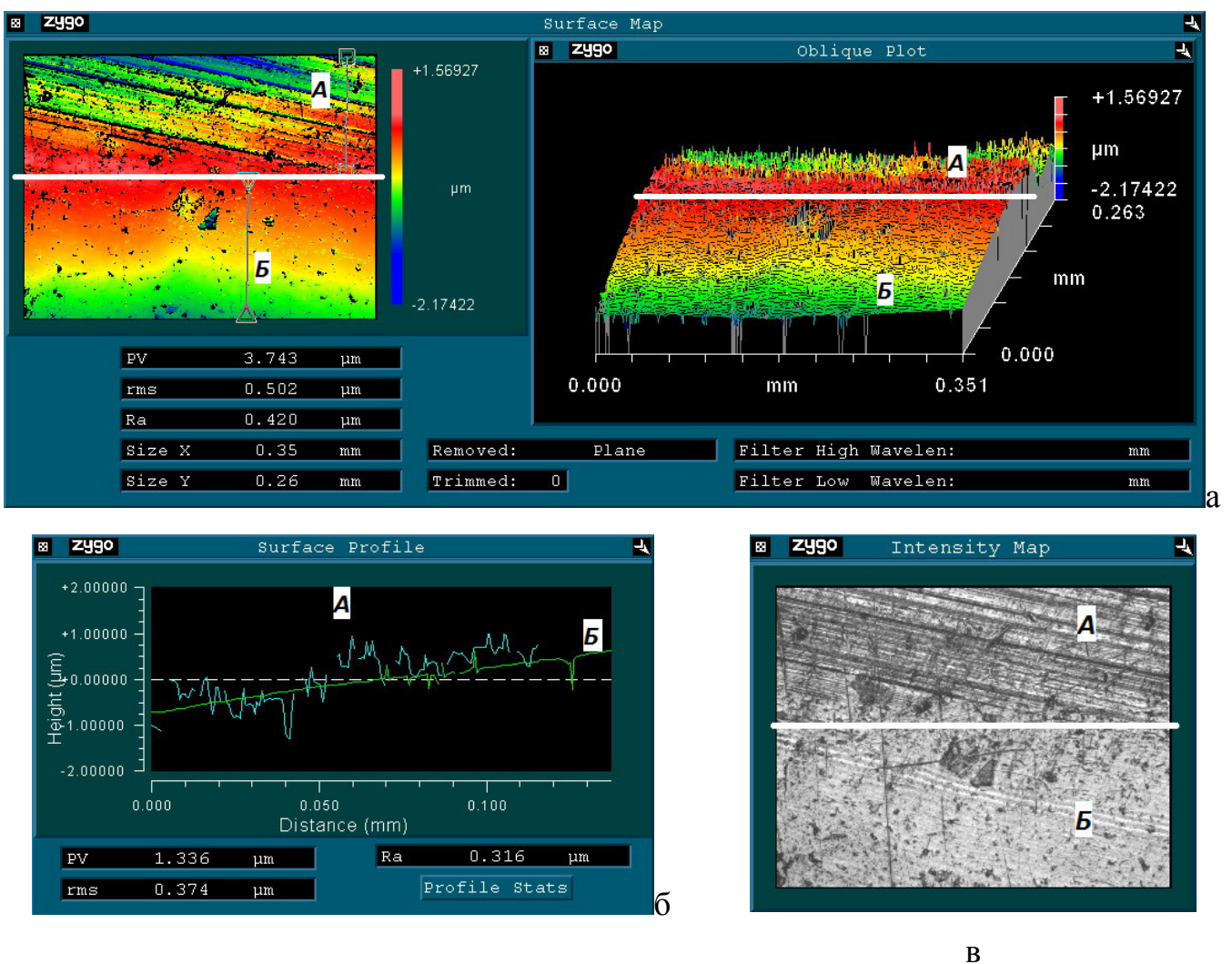
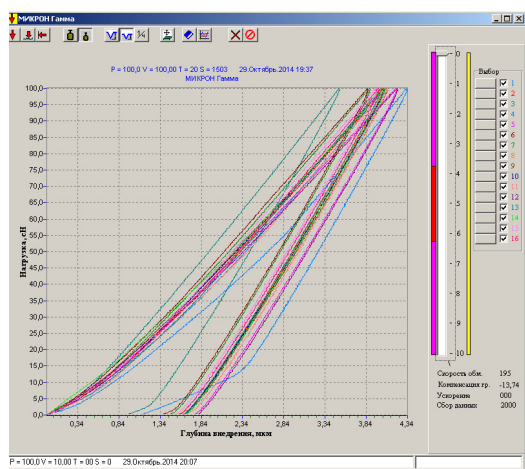


Рисунок 4.8 – 3D – профілометрія (а,б) и оптичне зображення (в) поверхні кільця (А) на межі з ямкою несправжнього бринелювання (Б).

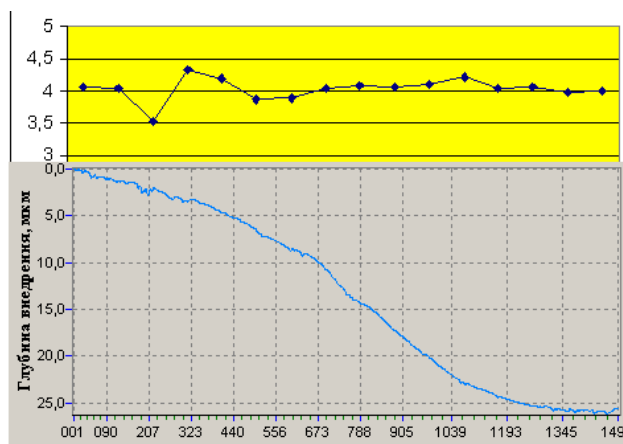
Мікротвердість. Аналізували мікротвердість матеріалу на дні канавки. У

зв'язку з тим, що поверхня мала певну кривизну, індентування провели з кроком 100 мкм від поверхні до середини дна ямки без застосування щупа (рис. 4.9, а). Відсутність точного базування індентора щодо поверхні в даному експерименті не дозволило точно визначити мікротвердість матеріалу в зоні зносу. Отримані дані можуть бути використані лише для порівняльного аналізу (рис. 4.9, б). Однак, навіть вони вказують на наявність локальної неоднорідності мікротвердості матеріалу підшипника (рис. 4.9, б).

Відомо, що під час зношування підшипника є два взаємопов'язані процеси: наклеп і знеміцнення матеріалу в зоні зношування. Зміцнення зумовлене генерацією і рухом дислокацій і перерозподілом напружень і деформацій в зоні контакту, в той час як знеміцнення, є наслідком локального нагрівання, формування дефектів і релаксаційних процесів в матеріалі [285]. Незважаючи на відмінність кутів нахилу стінок канавки зношування (рис. 4.9), мікротвердість матеріалу в різних зонах дефектів є незмінною, отже є певна взаємокомпенсація цих процесів.



а



б

Рисунок 4.9 – Діаграми індентування (а), вимірювання глибини індентування на різних відстанях від краю канавки (16-ть уколів) і профілограм дряпання поверхні (б) (профілограму одержано за навантаження на індентор 2 г);

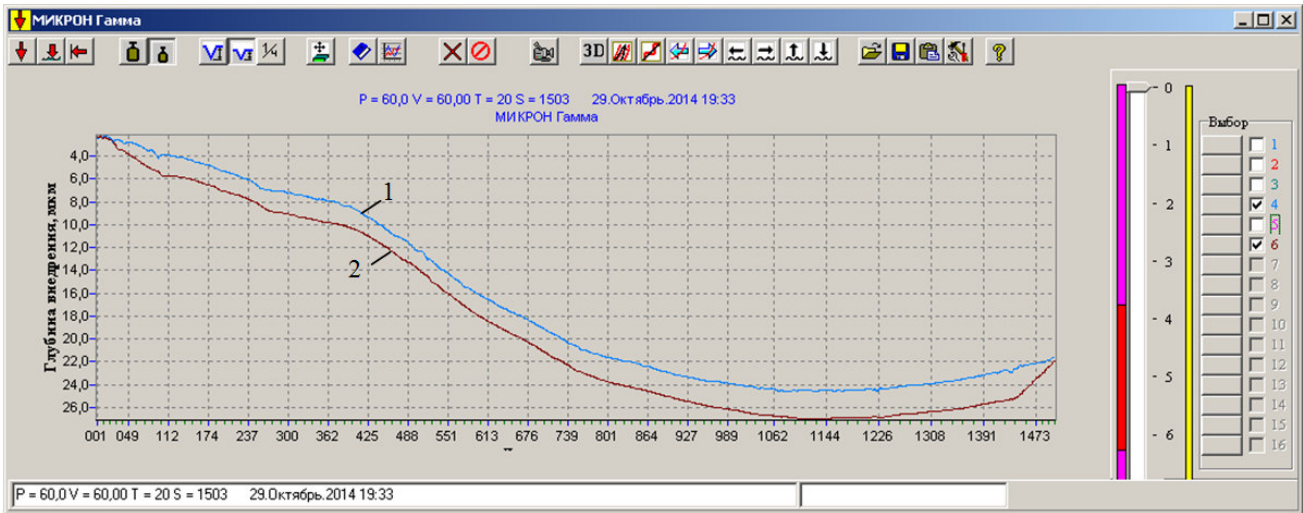
Склерометрія. Склерометрію з використанням алмазного наконечника (індентора) зазвичай застосовують в якості трибологічних методу для

визначення динамічних механічних властивостей поверхні внаслідок ряду переваг перед індентування: менший вплив пружного відновлення, можливість визначення анізотропії механічних властивостей [295]. Саме чутливість до анізотропії структури матеріалів на значних ділянках і зумовила використання цього методу, в даному випадку. Дряпання поверхні дефектів алмазним індентором (склерометрія) дозволило встановити, що поверхневий шар підшипника в зоні дефектів зазнавав значних пластичних деформацій, внаслідок неоднорідності значень сили тертя уздовж траси сканування. Багаторазове (повторне) сканування по одній і тій же трасі дозволило встановити наявність локальних зон знеміцнення на дні канавок (рис. 4.10 а, б). Наприклад, якщо на бічних поверхнях канавки різниця між глибинами втискання 5 мкм, то на дні 7,5 мкм, в 1,5 рази більше, що спостерігали за різних навантажень на индентор.

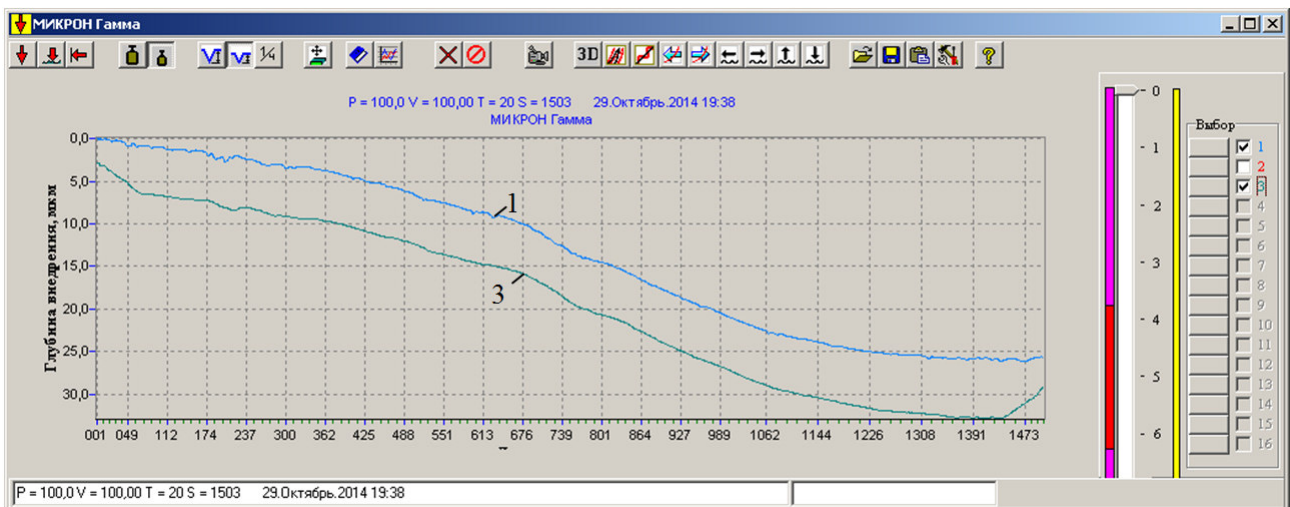
Зниження твердості на дні канавок пов'язане з впливом питомих навантажень в локальних точках контакту, але в цілому, мікротвердість поверхні майже не змінилася що помітно за незмінною шириною трібограм вздовж лінії сканування (рис. 4.10, в). Ці результати підтверджують дані рис. 4.3, з яких випливає, що вершина канавки (за досить пологих стінок) є місцем локалізації контактного тиску. Це призводить до локальної деформації матеріалу на її дні, появі залишкових деформацій, можливого перегріву цієї ділянки під час навантаження [296].

Розглянемо сукупність отриманих результатів, використовуючи концепцію масштабних рівнів деформування і руйнування. Відміністю цього походу від традиційної феноменологічної інтерпретації результатів деформації і зношування є розгляд твердого тіла як ієрархічної системи, в якій процеси деформації і руйнування розвиваються самоузгоджені на мікро-, мезо-, макрорівнях [283, 293, 296].

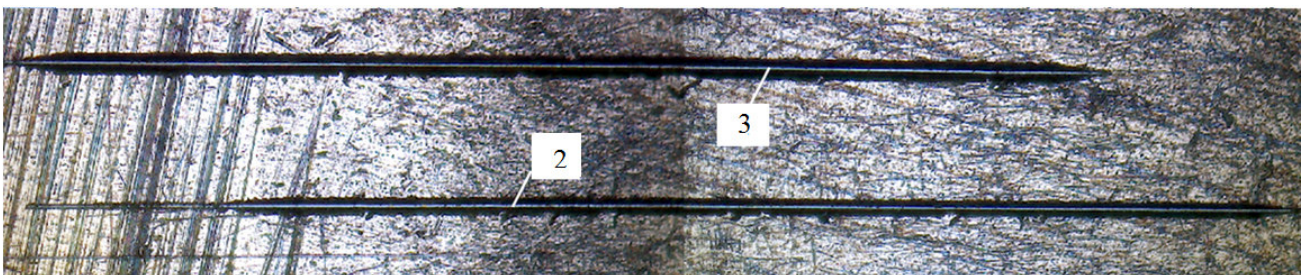
Макрорівень. Основною причиною появи «вм'ятин» на бігових доріжках підшипника є низькоамплітудні високочастотні коливання в зоні контакту «ролики - доріжка кочення» і порушень режиму їх змащування.



а



б



в

Рисунок 4.10 – Профілограма (1) і трибограма (2,3) за навантаження на індентор $P = 2$ г та подальшого 60 г (а), 100 г (б) і оптичне зображення поверхні тертя (в);
 1 – $P = 2$ г; 2 – $P = 60$ г; 3 – $P = 100$ г.

Це підтверджено літературними даними [286, 287], у яких обгрунтовано виникнення перевантажень і локалізацію деформації, витискання мастила,

нагрівання і появи плям контакту з перегрівом і відмінністю деформації в поверхневому шарі і нижчих шарах кілець підшипників. За циклічного навантаження механізму хитання і накладення низькоамплітудних вібрацій в поверхню ролика періодично виникають механічні напруження.

Мезорівень II. На межі двох середовищ виникають осциляції напружень, зумовлені з одного боку шорсткістю поверхні, а з іншого боку коливальними процесами, які спричиняють додаткове пошкодження поверхневого шару [281, 287, 298]. Локальні напруження значно перевищують середні значення напружень, що активувало зсувні процеси в зоні контакту роликів і поверхні бігової доріжки підшипника і зумовило виникнення концентраторів напружень. При цьому утворився пластично деформований поверхневий шар.

Мезорівень I. У межах пластично деформованого поверхневого шару, а також в силу невідповідності деформації в ньому і нижчих шарах, виникли процеси гофрування, що супроводжувались формуванням поперечних мезоскладок. Слід відзначити, що, описані деформаційні процеси не охоплюють всю поверхню тертя, а зосереджені в межах зони контакту «ролик-поверхня». Під час тертя змінювався напружено-деформований стан [285], що призвело до перерозподілу деформацій та подальшого формування рельєфних утворень (складок) в зоні зносу.

Мікрорівень. Силове навантаження поверхневого шару змінювало напружено-деформований стан його локальних ділянок, генерацію, накопичення і анігіляцію точкових дефектів, його контактне деформування [299]. При цьому основні релаксаційні процеси у його матеріалі виникали внаслідок утворення мікрозсувних деформацій. У зоні контакту, вже був наявний пошкоджений поверхневий шар, який поступово деградував, накопичував локальні структурні неоднорідності і пошкодження [300]. Мікрорівню притаманні зсувні процеси в зернах матеріалу, за пластичного навантаження, а також структурні зміни матеріалу в зоні контакту. В результаті відбулись структурно-фазові перетворення і викришування частинок (зношування), які також спричинили абразивний вплив на поверхню кільця.

Незначні розміри частинок зносу, що спостерігались, свідчать про оптимальне співвідношення поверхневих властивостей роликів і обойми підшипника [301]. Узагальнення механізмів пошкодження поверхні підшипника приведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Масштабні рівні і механізми виникнення пошкодженості

Тип пошкодження і масштабний рівень	Можливі причини	Механізм розвитку деформаційних процесів
1	2	3
Канавки «несправжнього бринелювання» (макрорівень – одиниці мм)	Вплив низькоамплитудних вібрацій, порушення режимів змащування	Локалізований (циклічний, ударний) вплив роликів на поверхню обойми.
Рельєф зношування дна канавки, складки, орієнтовані переважно вздовж її осі (мезорівень II – частки мкм)	Пластичне деформування зони контакту ролик-канавка	Багатократний циклічний вплив роликів на дно канавки з його пластичним деформуванням (зміцненням/знеміцненням)
Поперечні відносно осі канавки мезоскладки (мезорівень I - десятки - одиниці сотен мкм)	Пластичне деформування у плямах контакту на дні канавки	Локалізоване деформування поверхневого шару дна канавки, невідповідність деформації в ньому та розташованих нижче шарів, локальний нагрівання, гофрування, деформаційно - втомне зношування

1	2	3
Локальні структурно-фазові перетворення в окремих зернах, викришування мікрочастинок (<i>мікрорівень – одиниці – десятки микронів</i>)	Контакт, деформування, зминання, зрізання мікронеровностей і мікрошорсткостей	Локалізована деформація в мікроплямах контакту, цикличне зміцнення/знеміцнення, нагрівання, формування мікротріщин навколо часток вторинних фаз і значно деформованих мікрофрагментів поверхневого шару

У низці попередніх праць, на підставі багаторівневого підходу [276] було розроблено математичні методи моделювання процесів рельєфоутворення за різних видів температурно-силового впливу на поверхню матеріалів. Отримані у даній роботі результати є передумовою створення подібних алгоритмів обробки даних рельєфообразовання в зоні зношування, що на фізичному рівні узгоджується з раніше запропонованою моделлю [302, 303]. Це дозволить проводити статистичну обробку параметрів рельєфу локальних просторових ділянок (плям контакту) з урахуванням циклічності, стохастичності і наявності зонної просторової самоорганізації рельєфних утворень.

На підставі виявлених закономірностей деформування і руйнування кілець підшипника можна сформулювати ряд загальних рекомендацій, що сприяють виключенню або зниженню ймовірності виникнення пошкоджень. Зокрема слід рекомендувати підвищення точності параметрів коливального руху кристалізатора МБЛЗ, зниження ударних навантажень, коригування режимів мастила з метою створення поверхні розділу між роликками і кільцями, і нарешті, зниження рівня локалізації деформацій на всіх типах меж розділу. Додатково, оскільки появи канавок зношування сприяє вплив ударних навантажень і вібрації, можна рекомендувати підвищення ефективності

демпфірування, що також буде знижувати ймовірність порушення режиму змащення.

Узагальнені вище механізми зношування підтверджено аналізом експлуатаційних режимів роботи механізму. Аналіз геометрії плям контакту і дані трібограмм обґрунтовують висновок про нерівномірність розвитку зон локалізації тертя. Це підтверджують й літературні дані [282-288], які розглядають пошкодженість в зоні контакту як послідовність етапів локалізації деформування і зношування. У нашому випадку пошкодження може бути спричинене зупинками підшипника, внаслідок особливостей кінематики вузла коливання кристалізатора [282], коли між роликами і доріжкою кочення зникає мастильний шар, що забезпечує їх безпосередній контакт. Накладення високочастотних низькоамплітудних вібрацій, за таких умов, викликає незначні переміщення між тілами кочення і кільцями підшипника, що стимулюють утворення виявлених дефектів. Вочевидь, початкові стадії зношування майже не впливають на експлуатаційні параметри механізму коливання кристалізатора. Однак інтенсифікація зношування викликає нерівномірність руху і порушує кінематику переміщення механізму та додатково локалізує процеси тертя, інтенсифікує їх і викликає вихід підшипника з ладу [304].

Слід зазначити, що роликопідшипники мають схильність до таких пошкоджень [305], оскільки на відміну від шарикопідшипників мають можливість обертання лише в одному напрямку. Одним з найпростіших і найефективніших заходів, запобіганню виявлених негативних явищ є інтенсивніше змащування цього типу підшипників.

Запропоновано багаторівневий опис процесів деформації і руйнування, супроводжує зношування поверхні підшипника. Проілюстровано, що зношування є складним процесом, що містить різні взаємопов'язані механізми тертя і деформування на мезо- і макрорівні. При цьому, результат макроскопічної взаємодії ролика і поверхні визначається характером пружно-пластичного деформування, тертя і зношування локальних ділянок їх робочих поверхонь.

Кількісно описані морфологічні особливості поверхонь пошкоджених «несправжнім бринелюванням» на основі впливу на поверхню бігових доріжок підшипника пружнопластичного деформування і формування ділянок проковзування і зношування. Запропоновано рекомендації щодо можливого зниження інтенсивності процесів формування пошкодження в світлі запропонованої концепції масштабних рівнів деформування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Andrzej Dzierwa, Angelos P. Markopoulos. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines* 2019, 7, 11; doi:10.3390/machines7010011.
2. Applied Design of Experiments and Taguchi Methods - Kindle edition by Krishnaiah, K., Shahabudeen, P. PHI Learning Private Limited. New Delhi 2012. P. 362. ISBN-978-81-203-4527-0.
3. Assessment of Surface Texture; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996; 8p.
4. Barauskiene O., Zyhulia S.. Optimal control of the complex process of manufacturing cylindrical parts' printing equipment. *Технологія і техніка друкарства*. 2019. № 4(66). – p.42-55.
5. Bartarya, G., & Choudhury, S. K. (2014). Influence of machining parameters on forces and surface roughness during finish hard turning of EN 31 steel. *Proceedings of the Institution*.
6. Boothroyd G. Fundamentals Machining and Machine G. Tools. Boothroyd, W.A. Knight. – New York: Marcel Dekker, 1988. – 542 p.
7. Brammertz P. H. Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindreihen. – «Industrie-Anzeiger», 1961, 83, № 2.
8. Cao C., Zhu J., Tanaka T. (2020) Influence of Burnishing Process on Microstructure and Corrosion Properties of Mg Alloy AZ31. In: Itoh S., Shukla S. (eds) *Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_11.
9. Chen C.-C.A. A surface topography model for automated surface finishing./ C.-C.A. Chen, W.-C. Liu, N.A. Duffie// *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1998. – №38. – pp. 543-550.
10. Coba-Salcedo, Milton & Coral, Irene & Valencia, Guillermo. (2018). Characterization of surface topography with Abbott Firestone curve. *Contemporary Engineering Sciences*. 11. 3397-3407. 10.12988/ces.2018.87319.
11. Cveticanin L. Period of vibration of axially vibrating truly nonlinear rod. *Journal of Sound and Vibration*.374, 199–210 (2016).
12. Cveticanin L., PoganyT. Oscillator with a sum of non-integer order non-linearities. *Journal of Applied Mathematics*. 2012, Article ID 649050, 20 pages (2012).
13. Davidescu D.A., Pavelescu D., Tudor A., Seiciu L.P.. The importance of accuracy values of the abbotffirestone parameters curve for fractal and nonfractal calculus. *THE ANNALS OF UNIVERSITY “DUNĂREA DE JOS “OF GALAȚI FASCICLE VIII, 2004, Tribology*. pp.3-6.

14. Diltemiz S.F., Uzunonat Y., Kushan M.C., Celik O.N. Effect of dent geometry on fatigue life of aircraft structural cylinder part, *Engineering Failure Analysis*, (2009) 16 (4), pp. 1203-1207.
15. Dzyura V. Instrument for inner cylinder surfaces vibrating rolling and its structural parameters determination technique / Volodymyr Dzyura Petro Кривий, // Вісник ТНТУ, – Т. : ТНТУ, 2016 – Том 82. – № 2. – С. 70-81. – (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).
16. Dzyura V. Modeling of partially regular microreliefs formed on the end faces of rotation bodies by a vibration method. *UJMEMS*. 2020; Volume 6, Number 1: 30-38.
17. Dzyura V. O., Maruschak P. O., Zakiev I. M., Soroachak A. P. Analysis of Inner Surface Roughness Parameters of Load-carrying and Support Elements of Mechanical Systems. *IJE TRANSACTIONS B: Applications* Vol. 30, No. 8, (August 2017) 1170-1175.
18. Dzyura V., Kryvyi P., Tymoshenko N., Maruschak P., Nugaras J., Prentkovskis O. Probability-statistical estimation method of feed influence on as-turned finish of steels and non-ferrous metals. *Metals* 2018, 8, 965. DOI: 10.3390/met8110965.
19. Dzyura V., Maruschak P., Kozbur H., Kryvyi P., and Prentkovskis O., “Determining Optimal Parameters of Grooves of Partially Regular Microrelief Formed on End Faces of Rotary Bodies,” *Smart and Sustainable Manufacturing Systems* 5, no. 1 (2021): 1–12. <https://doi.org/10.1520/SSMS20200057>.
20. Dzyura V.O., Kryvyi P.D., Tymoshenko N.M., Krupa V.V. Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces. Volume 2: Processing, Detroit, Michigan, USA, June 9–13, 2014, ISBN: 978-0-7918-4581-3. DOI: 10.1115/MSEC2014-3946.
21. Dzyura Volodymyr, Kryvyi Petro, Maruschak Pavlo, Panin Sergey, Lyashuk Oleh, Vlasov, Ilya. Influence of Curvature and Cross-sectional Shape of Cylindrical Surface Formed by Turning on Its Roughness. - *Arabian Journal for Science and Engineering*. - 2020/04/10. 2191-4281. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04512-8>.
22. Dzyura, V.; Maruschak, P.; Prentkovskis, O. Determining Optimal Parameters of Regular Microrelief Formed on the End Surfaces of Rotary Bodies. *Algorithms* 2021, 14, 46. <https://doi.org/10.3390/a14020046>.
23. Fang, N. and Srinivasa Pai, P., "Evaluation and Modeling of the Effect of Tool Edge Radius on Machined Surface Roughness in Turning UNS A92024-T351 Aluminum Alloy," *Journal of Testing and Evaluation*, <https://doi.org/10.1520/JTE20180279>. ISSN 0090-3973.
24. Gomez-Gras G, Travieso-Rodríguez JA, González-Rojas HA, Napoles-Alberro A, Carrillo F, Dessen G. Study of a ball-burnishing vibration-assisted process. *Proc Inst Mech Eng*

Part B J Eng Manuf 2014;229(1):172–7 .

25. Goutam D. Revankar, Raviraj Shetty, Shrikantha S. Rao, Vinayak N. Gaitonde, Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy. *Measurement*, Volume 58, 2014, Pages 256-268.

26. Hamdi, Amine. (2020). Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. *Archive of Mechanical Engineering*. 67. 73-95. 10.24425/ame.2020.131684.

27. Hassan, A.M. The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals. *J. Mater. Process Technol.* 1997, 72, 385–391. [CrossRef]

28. <http://www.dak.com.ua/uk>

29. https://ozlib.com/822976/tehnika/mehanizm_obrazovaniya_poverhnostey_regulyarnym_mikrorelefom.

30. https://studref.com/591997/tehnika/regulyarnye_mikrorelefy_raznovidnosti

31. https://uk.wikipedia.org/wiki/Шорсткість_поверхні#cite_ref-1

32. ISO 13565-2:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties — Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve.

33. ISO 4288, Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface Texture: Profile Method-Rules and Procedures for the

34. ISO 8785 Surface Imperfections-Terms, Definitions, and Parameters; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1998; 20p.

35. John, M.R.S.; Wilson, A.W.; Bhardwaj, A.P.; Abraham, A.; Vinayagam, B.K. An investigation of ball burnishing process on CNC lathe using finite element analysis. *Simul. Model. Pract. Theory* 2016, 62, 88–101. [CrossRef]

36. Kryvyy P., Kryvinskyy P., Bodnar V., Sotnyk I., Senyk A.. "Theoretical and Experimental Substantiation of Angle Orientation of Rolling Bushings of Roller and Bushing Chains". Paper no. MSEC 2007-31211 International Manufacturing Science and Engineering conference. October 15-18, 2007, Atlanta, Georgia, USA, pp. 623-627.

37. Kryvyy Petro. Theoretical and Experimental Substantiation of Angle Orientation of Rolling Bushings of Roller and Bushing Chains / Petro Kryvyy, Petro Kryvinskyy, Volodymyr Bodnar, Iryna Sotnyk, Andriy Senyk // Paper no. MSEC 2007-31211 international Manufacturing Science and Engineering conference. – October 15-18, 2007, Atlanta, Georgia, USA. -pp. 623-627.

38. Kubatova, D. & Melichar, M. (2019). Roughness Evaluation Using Abbott-Firestone Curve Parameters, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0467-0475, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679,

Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063.

39. Lacalle, Luis. (2012). Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. P.997-1003

40. Laheurte, Raynald & Darnis, Philippe & Darbois, Nathalie & Cahuc, Olivier & Neauport, Jérôme. (2012). Subsurface damage distribution characterization of ground surfaces using Abbott–Firestone curves. *Optics express*. 20. 13551-9. 10.1364/OE.20.013551.

41. Lin S.C. A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning/ S.C. Lin, M.F. Chang// *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1998. – №38. – pp. 763-782.

42. Luis N. López de Lacalle, A. Rodríguez, A. Lamikiz, A. Celaya & R. Alberdi (2011) Five-Axis Machining and Burnishing of Complex Parts for the Improvement of Surface Roughness, *Materials and Manufacturing Processes*, 26:8, 997-1003, DOI: 10.1080/10426914.2010.529589

43. Maohua Xiao, Xiaojie Shen, You Ma, Fei Yang, Nong Gao, Weihua Wei, and Dan Wu Prediction of Surface Roughness and Optimization of Cutting Parameters of Stainless Steel Turning Based on RSM Mathematical Problems in Engineering. Volume 2018, Article ID 9051084, 15 pages.

44. Nagit G., Slatineanu L., Dodun O., Ripanu M., Mihalache A. (2019). Surface layer microhardness and roughness after applying a vibroburnishing process. *Journal of Materials Research and Technology*. 8. 10.1016/j.jmrt.2019.07.044.

45. Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y. et al. Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. *Tribol Lett* 29, 241–252 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11249-008-9302-9>

46. Pawel Pawlus, Rafal Reizer, Michal Wieczorowski, Grzegorz Krolczyk, Material ratio curve as information on the state of surface topography—A review, *Precision Engineering*, Volume 65, 2020, Pages 240-258,

47. Pawlus, P.; Reizer, R.; Wieczorowski, M. Reverse Problem in Surface Texture Analysis—One-Process Profile Modeling on the Basis of Measured Two-Process Profile after Machining or Wear. *Materials* 2019, 12(24), 4169; <https://doi.org/10.3390/ma12244169>.

48. Prediction of Surface Roughness and Optimization of Cutting Parameters of Stainless Steel Turning Based on RSM. Maohua Xiao, Xiaojie Shen, You Ma, Fei Yang, Nong Gao, Weihua Wei, Dan Wu. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering* Volume 2018, Article ID 9051084, 15 pages <https://doi.org/10.1155/2018/9051084>.

49. Preger K.-Th. Vorschläge für die Ermittlung der Schleifleistung und für eine

ergänzende Kennzeichnung der Schleifscheiben. – «Werkstatt und Betrieb», 97, 1964, H9.

50. Radionenko, O., Kindrachuk, M., Tisov, O., & Kryzhanovskiy, A. (2018). Features of transition modes of friction surfaces with partially regular microrelief. *Aviation*, 22(3), 86-92. <https://doi.org/10.3846/aviation.2018.6204>.

51. Rao, P.N. *Manufacturing Technology: Metal Cutting and Machine Tools*; Tata McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2013; 521p.

52. Rîpă, Minodora & Deleanu (Tomescu), Lorena & Hapenciuc, Mioara & Crudu, Ion. (2003). Tribological characterisation of surface topography using abbot-firestone curve.

53. S. Wang, M. Tomovic, L. Hong *Commercial aircraft hydraulic systems*, Elsevier, Amsterdam (2016), pp. 53-60.

54. Sagbas, A. Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function. *Adv. Eng. Softw.* 2011, 42, 992–998. [CrossRef],

55. Sánchez Egea A.J., Rodríguez A., Celentano D., Calleja A., López de Lacalle L.N., Joining metrics enhancement when combining FSW and ball-burnishing in a 2050 aluminium alloy, *Surface and Coatings Technology*. Volume 367. 2019. Pages 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.010>

56. Shaw, M.C. *Metal Cutting Principles*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1984; pp. 487–519.

57. Slavov S., Dimitrov D., Iliev I. “Variability of regular relief cells formed on complex functional surfaces by simultaneous five-axis ball burnishing,” *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2020, 82(3), pp. 195-206.

58. Slavov S., Iliev I. Design and FEM static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts, *Fiability & Durability*, ISSN 1844 – 640X, 2016, Nov 1(2).

59. Slavov, S.; Dimitrov, D.; Konsulova-Bakalova, M.; Vasileva, D. Impact of Ball Burnished Regular Reliefs on Fatigue Life of AISI 304 and 316L Austenitic Stainless Steels. *Materials* 2021, 14, 2529. <https://doi.org/10.3390/ma14102529>.

60. Slawomir Wos, Waldemar Koszela, Pawel Pawlus Comparing tribological effects of various chevron-based surface textures under lubricated unidirectional sliding. *Tribology International* 146 (2020) 106205 <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106205>.

61. Sokil B. I., Pukach P. Ya., Sokil M. B., Vovk M. I. Advanced asymptotic approaches and perturbation theory methods in the study of the mathematical model of single-frequency oscillations of a nonlinear elastic body. *Mathematical modeling and computing*, vol. 7, no. 2, pp. 269–277 (2020).

62. Stoyan D. Slavov, Diyan M. Dimitrov. A study for determining the most significant parameters of the ball-burnishing process over some roughness parameters of planar surfaces carried out on CNC milling machine. MATEC Web of Conferences 178, 02005 (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817802005>
63. Thomas M. Effect of tool vibrations on surface roughness during lathe dry turning process./ M. Thomas, Y. Beauchamp, A.Y. Youssef, J. Masounave// Computers in Industrial Engineering. – 1996. – №31. – pp. 637-644.
64. Toulfatzis, A.I.; Pantazopoulos, G.A.; David, C.N.; Sagris, D.S.; Paipetis, A.S. Machinability of Eco-Friendly Lead-Free Brass Alloys: Cutting-Force and Surface-Roughness Optimization. Metals 2018, 8, 250.
65. Viacheslav Stadnychenko, Valeriy Varvarov, Results of Theoretical and Experimental Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems, Advances in Materials. Vol. 8, No. 4, 2019, pp. 156-165. doi: 10.11648/j.am.20190804.14
66. Volodymyr Hutsaylyuk, Iaroslav Lytvynenko, Pavlo Maruschak, Volodymyr Dzyura, Georg Schnell. A new method for modeling the cyclic structure of the surface microrelief of titanium alloy Ti6Al4V after processing with femtosecond pulses. Materials 2020, 13(21), 4983; <https://doi.org/10.3390/ma13214983>.
67. Wang, Shaoping; Tomovic, Mileta; and Liu, Hong, "Commercial Aircraft Hydraulic Systems: Shanghai Jiao Tong University Press Aerospace Series" (2015). Engineering Technology Faculty Books. 1, https://digitalcommons.odu.edu/engtech_books/1
68. X. P. Ouyang, F. Gao, H.Y. Yang, H.X. Wang Two-dimensional stress analysis of the aircraft hydraulic system pipeline, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering 226(5):532-539, <https://doi.org/10.1177/0954410011413011>
69. Zdenko LIPA, Dagmar TOMANIČKOVÁ. Utilisation of abbot-firestone curves characteristics for the determination of turned surface properties. ANNALS OF FACULTY ENGINEERING HUNEDOARA – International Journal Of Engineering. IX. 2011. p.223-226.
70. Zhang, Y., Zeng, L., Wu, Z., Ding, X. and Chen, K. (2019), Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston. Micro Nano Lett., 14: 424-429. <https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5535>.
71. Zhang, Y., Zeng, L., Wu, Z., Ding, X. and Chen, K. (2019), Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston. Micro Nano Lett., 14: 424-429. <https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5535>.
72. А.с. 203713 СССР МПК С21 D 39/00. Устройство для обработки плоских линейчатых поверхностей деталей / Ю.Г. Шнейдер, А.Н. Кравцов, И.Я. Персин, Г.Г. Теннинсон (СССР). – №1125636/22-1, Заявл. 05.01.1967, Опубл. 09.10.1967. Бюл. №21.

73. А.с. 313647 СССР МПК В24 D 39/02. Способ упрочнения поверхности металлических изделий / Ю.Г. Шнейдер, Г.Г. Лебединский (СССР). – №1442838/25-27, Заявл. 25.05.1970, Опубл. 07.09.1971. Бюл. №27.
74. А.с. 319455 СССР МПК В24 D 39/00. Устройство для обработки плоских поверхностей виброобкатыванием / Ю.Г. Шнейдер, Ю.И. Мулин (СССР). – №1309524/25-8, Заявл. 21.11.1969, Опубл. 02.11.1971. Бюл. №33.
75. А.с. 415148 СССР МПК В24 В 39/00. Раскатник / О.П. Терехов, А.М. Правян (СССР). – №1730300/25-8, Заявл. 28.11.1971, Опубл. 17.07.1974. Бюл. №6.
76. А.с. 589111 СССР МПК В24 В 39/04. Инструмент для чистовой обработки наружных поверхностей / В.В. Корнев, А.А. Козырев, Л.Г. Одинцов (СССР). – №1442838/25-27, Заявл. 08.09.1976, Опубл. 25.01.1978. Бюл. №3.
77. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
78. Азаревич Г. М. Бернштейн Г. Ш. Исследование процесса чистовой обработки многороликowymi дифференциальными инструментами. В кн.: Размерно-чистовая обработка деталей пластическим деформированием взамен обработки резанием. - М.: НИИмаш, 1966.
79. Азаревич Г. М., Бернштейн Г. Ш. Чистовая обработка наружных цилиндрических поверхностей пластическим деформированием. -М.: ОНТИ, 1963. 73 с.
80. Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент: Изд. 3-е переработ. и допол. – М.: Машиностроение, 1975. – 440 с.
81. Афтаназів І. С. Дослідження динамічних характеристик вібраційно-відцентрового зміцнення довго вимірних циліндричних деталей / І. С. Афтаназів, Я. М. Литвиняк, Я. М. Кусий // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2004. – № 515 : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 55-64.
82. Афтаназів І. С. Дослідження динамічних характеристик вібраційно-відцентрового зміцнення довго вимірних циліндричних деталей / І. С. Афтаназів, Я. М. Литвиняк, Я. М. Кусий // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2004. – № 515 : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 55-64.
83. Афтаназів І. С. Розрахунок енергії вібраційних зміцнювальних пристроїв з електромагнітним приводом та пружною системою / І. С. Афтаназів, В. В. Винник, Я. М. Кусий // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні / Державний університет "Львівська політехніка". – Львів : Видавництво Державного університету "Львівська політехніка", 2000. – Випуск 35. – С. 32–39.

84. Афтаназів І.С., Кусий Я.М. Аналіз та вибір оптимальних фінішних операцій технологічного процесу виготовлення довгомірних циліндричних деталей // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". - 2000. - № 412. - С. 3-11.

85. Афтаназів І.С., Кусий Я.М. Пристрій з електромагнітним приводом для зміцнення зовнішніх поверхонь довгомірних деталей // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – 1999. – № 359. – С. 36–41.

86. Афтаназів І.С., Кусий Я.М., Баранецька О.Р., Широков В.В. Вплив технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювального оброблення на фізичні параметри якості довгомірних циліндричних деталей із сталі 45 // Матеріали II Міжнар. наук.-техн. конф. “Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях”. – Славсько, 26 лютого – 1 березня 2002 р. – С. 114.

87. Афтаназів І.С., Кусий Я.М., Свіч А., Собачек А., Юрчишин І.І. Огляд технологій викінчувального оброблення довгомірних стержневих виробів // Вісник Житомирського інж.-технол. ін-ту. Спец. вип. за матеріалами II Міжнародної науково-технічної конференції “Процеси механічної обробки, верстати та інструменти”. – Житомир, 2001. – С. 60–68.

88. Барац, Я.И. Обработка поверхностей отверстий методом поверхностно-пластического деформирования с образованием регулярного микрорельефа / Я.И.Барац, Л.Р.Милованова // Металлообработка 2006. - № 3 - с. 28-34.

89. Башков В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1985. – 136 с.

90. Белов В. А. Исследование метода упрочнения плоскостей шариковыми головками и влияние его на эксплуатационные свойства поверхности. – Автореф. дис. . . канд. техн. наук. – Л. 1964.

91. Беловод А. И., Дудников И. А., Дудников А. А. Характер деформирования материала при вибрационном нагружении // Вібрації в техніці та технологіях. № 2 (54), 2009. – с. 5-8

92. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / Бобров В.Ф. – М. Машиностроение, 1975. – 344 с.

93. Болдин Л.А. Основы взаимозаменяемости и стандартизации в машиностроении М.: Машиностроение, 1984. – 2 изд. – 272 с.

94. Боярский В.Г. Самоустанавливаемость плавающего резцового блока в комбинированном инструменте при обработке на труборасточных станках // В.Г. Боярский, К.Т. Шеров, М.Р. Сихимбаев, В.Ф. Макеев. Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-2. – С. 414-418.

95. Браславский В. М. Отделка поверхностей крупных деталей обкатыванием

цилиндрическими роликами. В кн.: Размерно-чистовая обработка деталей машин пластическим деформированием взамен обработки резанием. - М.: НИИмаш, 1965, С. 83-98.

96. Браславский В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами. 2-е изд. -М.: Машиностроение, 1975. - 159 с.

97. Валяев Ф.Ф. Исследование процесса дорнования отверстий тонкостенных деталей: Автореф. дис. – Ростов н/Д, 1972. – 22с.

98. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

99. Витенберг Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. / Ю. Р. Витенберг. – Л. : Судостроение, 1971. – 108 с.

100. Вовк Ю.Я. Самовстановлювальні інструментальні блоки з пружними зв'язками для обробки отворів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. Наук : 05.03.01 / Вовк Юрій Ярославович; Терноп. держ. техн. ун-т ім. І.Пулюя. – Т., 2007. – 197 с.

101. Гаврилов А.Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении. Машиностроение. – Москва. – 567 с.

102. Гаврилюк В. Г., Кукляк М. Л. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання. Навчальний посібник для студентів механічних та машинобудівних спеціальностей. – К: УМКВО, 1990. – 210 с.

103. Гавриш А.П. Зміцнення металевих поверхонь деталей машин та механізмів / Гавриш А.П., Киричок П.О., Підберезний М.П. – Київ: Наукова думка, 1995. – 174 с.

104. Гаскаров Д.В. Малая выборка / Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. – М.: Статистика, 1978. – 248 с.

105. ГОСТ 16514-96 Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Общие технические требования. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ Дата введения 01.01.2002 (Докипедия: ГОСТ 16514-96 Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Общие технические требования).

106. ГОСТ 17574-72. Раскатки многошариковые жесткие дифференциальные диаметром от 40 до 300 мм для размерно-чистовой обработки отверстий деталей давлением. Технические требования (с Изменением N 1). Введ. 1973-07-01. М. : Изд.-во стандартов, 1983. – 10 с.

107. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей.– М. : Изд.-во стандартов, 1986. – 45 с.

108. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей.. [действителен от 1981.03.18]. – Международный стандарт СССР. Группа Г06. – М.: Изд.-во. ГОСТстандарт. – 1989. – с.45.

109. ГОСТ 24773-81 Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация,

параметры и характеристики. Введ. 1982–07–01. – М. : Изд.-во стандартов, 1988. – 14 с.

110. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. (СТ СЭВ 638-77). Взамен ГОСТ 2789-59. Введ. 1975-01-01. М. : Изд.-во стандартов, 1973. – 14 с.

111. ГОСТ 8908-81(СТСЭВ 178-75; СТСЭВ 513-77) Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные углы и допуски улов. Введ. 1982–01–01. – М. : Изд.-во стандартов, 1982. – 10 с.

112. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – М. : Стандартиформ, 2015. – 18 с.

113. ГОСТ17574-72. Раскатки многошариковые жесткие дифференциальные диаметром от 40 до 300 мм для размерно-чистой обработки отверстий деталей давлением. Технические требования (с Изменением N 1). Введ. 1973-07-01. М. : Изд.-во стандартов, 1983. – 10 с.

114. Грановский Г.И. Резания металлов / Грановский Г.И., Грудов П.П., Кривцов и др. под ред. В.А. Кривоухова. – М.: Машгиз, 1954. – 472 с.

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

116. Гуров Р.В. Основы проектирования инструмента для различных методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием. // Вестник Брянского государственного технического университета. 2006. № 2 (10). С.106-113.

117. Дельта–функция. “Математика” [электронный ресурс].URL: <https://mathworld.wolfram.com/DeltaFunction.html>.

118. Демаков И.П. Организация испытаний на надежность и обработка их результатов / И.П. Демаков, Ю.Г. Белагезян. – М. Машиностроение : 1974. – 56 с.

119. Демаков И.П., Потепун В.Е. Статистические методы определения законов распределения при анализе точности и надежности промышленных изделий по результатам эксперимента / И.П. Демаков, В.Е. Потепун. – Л. : Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1970, 39 с.

120. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин.- М.: Машиностроение,1981.-244 с.

121. Дзыра Б. И. К вопросу обоснования метода усреднения для исследования

одночастотных колебаний, возбуждаемых мгновенными силами / Дзыра Б. И. // Аналитические и качественные методы исследования дифференциальных и дифференциально-разностных уравнений. – Киев: Изд-во Ин-та математики, 1977. – С. 34-38.

122. Дзыра Б. И. О влиянии параметрической нагрузки импульсного вида на нелинейную колебательную систему / Дзыра Б. И., Ищук В. В. // Аналитические и качественные методы исследования дифференциальных и дифференциально-разностных уравнений. – Киев: Изд-во Ин-та математики, 1977. – С. 39-59.

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

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

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

126. Дзюра В.О. Класифікація частково регулярних мікрорельєфів, сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання. / В.О. Дзюра // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. - 2020. - Вип. 3(34). - С.129-135.

127. Дзюра В.О. Кривий П.Д. Прогресивна дворіцева адаптивна розточувальна головка. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2016. – № 3 (78) (2016) – с. 20-27.

128. Дзюра В.О. Статистическое оценивание отклонений от округлости свертных втулок приводных роликовых цепей. Международный инженерный журнал «Приводы и компоненты машин», 2015, №4-5.2015(17). Научно-исследовательское предприятие «Подъемтранссервис», 2015. – с. 10-14.

129. Дзюра В.О., Кривий П.Д. Дворіцева адаптивна розточувальна головка. Патент на винахід № 114667 В23В 29/03; заявлено 16.10.2015, опубліковано 10.07.2017, бюл. № 13.

130. Добротворский С. С. Методы прогнозирования шероховатости поверхности: обзор / С. С. Добротворский, Е. В. Басова. // Вісник Національного технічного університету

"Харківський політехнічний інститут" : зб. наук. пр. ; тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 41. – С.23–45.

131. Допуски и посадки: Справочник. В 2-х ч./ В.Д. Мягков, М.А. Палей. - 6 изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. – 543 с.

132. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч. Посібник / М. Дорожовець. – Львів : Ви-во Нац. унів. «Львівська політехніка», 2007. – 624 с.

133. ДСТУ 2413-94 «Вимірювання параметрів шорсткості. Терміни та визначення» – Введ. 1995–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 22 с.

134. ДСТУ ISO 286-1-2002 «Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилів та посадок». – Чинний від 2003–10–01. – Київ : Держстандарт, 2002. – 15 с.

135. Дудников А.А., Дудников И.А., Беловод А.И. Упрочнение поверхности деталей вибрационным методом / Вібрації в техніці та технологіях. № 4 (56). 2009. – С.82-84

136. Дунин-Барковский, И. В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М. : Машиностроение, 1978. – 232 с.

137. Душинський В. В. Основи наукових досліджень. Теорія і практикум з програмним забезпеченням / Душинський В. В. – К. : НТУУ «КПІ», 1998. – 408 с.

138. Дьяченко П.Е. Исследование зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки, М.: АН СССР, 1949, 126 с.

139. Екимов В.В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. – Л.: Судостроение, 1966. – 328 с.

140. Жебровская-Луцик С. Методы определения формы цилиндрических деталей // Вестник машиностроения, 1980. №12. – с.41-49.

141. Зигуля С. М. Алгоритм керування комплексним технологічним процесом формування повністю регулярного мікрорельєфу / С. М. Зигуля // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2013. – № 4. – С. 40–47.

142. Исаев А.И. Микрогеометрия поверхности при токарной обработке. – М. -Л.: Издательство Академии Наук СССР, 1950. - 107 с.

143. Исаев А.Н. Упругое восстановление разметов отверстий после дорнования трубчатых заготовок // Вестник ДГТУ. 2004. Т.4. №4 (22). – С.437-442.

144. Исаев И.В. Исследование и оптимизация обработки гильз цилиндров двигателей ЗМЗ 24 методом ППД: Автореф. дис. канд. тех. наук. -Владимир, 1979.-19 с.

145. Капустян О.В. Екстремальні задачі. Теорія. Приклади. Методи розв'язування/ Капустян О.В., Перестюк М.О. Стенжицький О.М. // К.: ВПЦ Київ-унту. 2019.-71 с.

146. Киричек, А. В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки

поверхностным пластическим деформированием / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьёв, А. Г. Лазуткин. – М. : Машиностроение, 2004. – 288 с.

147. Киричок П. О. Дослідження впливу параметрів мікрорельєфу на якість обробки деталей та експлуатаційні характеристики поліграфічного обладнання / П. О. Киричок, А. В. Несхозієвський // Технологічні комплекси / Вид-во Луцьк. нац. технол. ун-ту. – 2007. – № 3–4. – С. 74–80.

148. Киричок П. О. Класифікація пристроїв для оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / П. О. Киричок, І. В. Попов // Технологія і техніка друкарства : збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 2(32). – С. 181–185.

149. Киричок П. О. Програмне забезпечення з розрахунку процесів оздоблювально-зміцнюючої обробки циліндричних поверхонь / П. О. Киричок, О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2007. – № 3–4. – С. 80–85.

150. Киричок П. О. Технологічне забезпечення працездатності та надійності елементів та вузлів поліграфічних машин / П. О. Киричок // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2003. – № 1. – С. 71–79.

151. Киричок П.О. Комплексна оздоблювально-зміцнююча обробка циліндричних поверхонь/ П.О. Киричок, О.І. Хмілярчук // Машини і автоматизовані комплекси. – 2003 - №8

152. Киричок П.О. Методика визначення площі перекриття нерівностей при утворенні мікрорельєфів II та III видів при оздоблювально-зміцнюючій обробці / П. О. Киричок, О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства. – 2005. – № 2(8). – С. 73–78.

153. Киричок П.О. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей виробів при оздоблювально-зміцнюючій обробці. Киричок П.О. Автореферат дисертації на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук. – Київ, 1995. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Спец. 05.02.08 – Технологія машинобудування. – 32 с.

154. Киричок Т. Ю. Керування технологічними процесами оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / Т. Ю. Киричок, В. Г. Олійник // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2007. – № 3–4. – С. 74–80.

155. Кирсанов С.В. Инструменты для обработки точных отверстий / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе, В.И. Кокарев. – М.: Машиностроение, 2005. – 336 с.

156. Клушин М.И. Резание металлов. Изд. Второе переработ. – М.: госнаучтехиздат машиностроительной литературы, 1958. – 454с.

157. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей / Колкер Я.Д. – К.: Техника, 1976. – 200 с.

158. Кочин А.Н., Желонкин М.В., Головин А.А.. Влияние регулярного микрорельефа на эксплуатационные показатели деталей машин. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 3(110). 2015. – с.104-109.

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

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

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

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

163. Кривий П.Д. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П.Д. Кривий, В.В. Крупа // Вісник ЖДТУ. 2012. 2 (61)– С. 15-25.

164. Кривий П.Д. Трансформація пластичності зрізуваного шару при свердлінні / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2009. – Вип. 25. – с.15-25.

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

166. Кривий П.Д., Дзюра В.О. Обґрунтування конструктивних параметрів інструмента для формування регулярних микрорельєфів на внутрішніх циліндричних

поверхнях. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції 31 травня – 3 червня 2016 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова, д-ра техн. наук – Краматорськ : ДДМА, 2016. – С. 46.

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

168. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Апостол Ю.О., Тимошенко Н.М. Спосіб вимірювання шорсткості циліндричної поверхні. Деклараційний патент на корисну модель № 129762 G01B 21/30; заявлено 14.05.2018, опубліковано 12.11.2018, бюл. № 21.

169. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Дичковський М.Г. Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу віброобточуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях. Патент на винахід № 117380 B24B 39/02; заявлено 25.10.2017, опубліковано 25.07.2018, бюл. № 20.

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

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

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

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

174. Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Кривінський П.П. Метод визначення впливу кривизни обробленої поверхні сформованої обточуванням та

розточуванням на її шорсткість. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (м. Тернопіль, 25-26 листопада 2015 року) – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 135-136.

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

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

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

178. Кривий П.Д., Сенік А.А., Дзюра В.О., Кобельник В.Б.. Дослідження мікрогеометрії поперечних циліндричних перерізів циліндричних поверхонь на прикладі шкворневих втулок. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування : матеріали 7-ї Міжнародної науково-практичної конференції 22-23 вересня 2016 року – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2016. — С. 188-189.

179. Кривий П.Д., Тимошенко Н.М., Дзюра В.О., Кашуба Н.П. Імовірнісний підхід при визначенні відносної площі віброобкочування плоских поверхонь. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11–12 грудн. 2013.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2013. – С.104.

180. Кривий П.Д.. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П.Д. Кривий, В.В. Крупа // Вісник ЖДТУ. 2012. 2 (61)– С. 15-25.

181. Крупа В. В. Металорізальні інструменти з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів : дис. канд. техн. наук, спец. 05.03.01 / Крупа Володимир Васильович - Тернопіль, 2015. - 185 с.

182. Кузьмин Ю. П., Помпеев К. П., Целищев А. А. Использование фрезерного

станка с ЧПУ для нанесения регулярного микрорельефа на поверхности заготовки // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С.273-277.

183. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С. Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с/

184. Кусий Я. М. Прогнозування технологічних параметрів вібраційно-відцентрованого зміцнення деталей із конструкційних матеріалів / Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький, О. Т. Велика // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2007. – № 583. – С. 3–11.

185. Кусий Я. М. Стан та перспективи розвитку методів викінчувального оброблення довгомірних циліндричних деталей (огляд) / Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький, В. В. Широков // Наук. нотатки: міжвуз. зб. (за напрямом «Інж. механіка»).– Вип. 20. – Луцьк: Вид-во ЛДТУ, 2007.– С. 249-260.

186. Кусий Я.М. / Дослідження микрорельефу віброзміцнених втулок бурових pomp // Кусий Я.М., Топільницький В.Г., Василів Х.Б., 2011

187. Кусий Я.М. Технологічне забезпечення фізико-механічних параметрів поверхневих шарів металевих довгомірних циліндричних деталей вібраційно-відцентровим зміцненням: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – Львів, 2002. – 260 с. – Рукопис.

188. Кусий Я.М., Баранецька О.Р. Аналіз впливу технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювального оброблення на фізичні параметри якості довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2002. – № 442: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – С. 43–52.

189. Кусий Я.М.. Дослідження впливу режимів вібраційно-відцентрового зміцнення на геометричні параметри якості поверхні довгомірних циліндричних деталей / Я.М. Кусий, В.Г. Топільницький // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів : Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Вип. 43. 2009. – Вип. 43. – С. 44-51.

190. Лепихов В.Г. Самоустанавливающиеся инструменты / В.Г. Лепихов – М.: Машиностроение, 1974. – 80 с.

191. Лешенкова Л.Р. Повышение производительности процесса и улучшение эксплуатационных свойств отверстий методом пластического деформирования с образованием регулярного микрорельефа: дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.03.01. «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Л.Р. Лешенкова. – Саратов, 2002. – 18 с.

192. Личковаха Андрей Сергеевич. Повышение качества финишной обработки ремонтируемых гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.03.- зерноград, 2006.- 212 с.
193. Лотоцька О. І. Комплексна технологія формування мікрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин : дис. ...канд. техн. наук : 05.05.01 / Лотоцька Оксана Іванівна. – Київ, 2012. – 179 с.
194. Лотоцька О. І. Теоретичні розрахунки опорної площі на циліндричних поверхнях деталей поліграфічного обладнання / О. І. Лотоцька // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2011. – № 2. – С. 66–72.
195. Лотоцька О. І. Узагальнена класифікація пристроїв та інструменту для виконання вібраційного обкатування на деталях поліграфічного обладнання / О. І. Лотоцька // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2014. – № 2. – С. 112–123.
196. Лукьянов В. С. Параметры шероховатости поверхности / В. С. Лукьянов, Я. А. Рудзит. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 162 с.
197. Луців І. Формування шорсткості і хвилястості поверхні при багатолезовій адаптивній обробці / І. Луців // Вісник Тернопільського державного технічного університету, 1999, т.4, №3, с.135-138.
198. Луців І.В. Порівняльна характеристика процесу самовстановлювання чотирилезового інструменту для зенкерування отворів та існуючих самовстановлюваних інструментів / І.В. Луців Ю.Я. Вовк // Матеріали 3-ї Всеукраїнської конференції: «Современные металлорежущие системы машиностроения». – Донецьк, 2002. – С.78-82.
199. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение на Украине // Сучасне машинознавство. 1999. № 1/99. С.99–104.
200. Маркович Б.М. Рівняння математичної фізики. Навчальний посібник. Львів: Вид-во Львівської політехніки.-2010.-384с.
201. Марущак П.О., Дзюра В.О., Литвиненко Я.В. Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу. Деклараційний патент на корисну модель № 141520 В24В 39/00; заявлено 21.10.2019, опубліковано 10.04.2020, бюл. № 7.
202. Марущак П.О., Литвиненко Я.В., Дзюра В.О. Спосіб визначення параметрів профілограми. Деклараційний патент на корисну модель № 142750 G01В 21/30; заявлено 02.01.2020, опубліковано 25.06.2020, бюл. № 12.
203. Маталин А.А. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства деталей. // Вестник машиностроения. - №11. - 1968.- 234 с.
204. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей

машин / Маталин А.А. – К.: Техника, 1971. – 142 с.

205. Мельников П.А. Математическая модель формирования микрорельефа шейки вала при обработке алмазным выглаживанием. П.А. Мельников, А.Н. Пахоменко, А.А. Лукьянов. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. № 2 (32-2). – с.104-111.

206. Митропольский Ю. А. Асимптотические решения уравнений в частных производных / Ю. А. Митропольский., Б. И. Мосеевков. – Киев: Вища школа, 1976. – 584 с.

207. Моргунов А. П., Глушеч В. А., Стрек Я. М.. Моделирование процесса формирования многоуровневого микрорельефа поверхностным пластическим деформированием. Омский национальный вестник. – №3 (36). – 2006. – с. 79-85.

208. Нагоркин Максим Николаевич. Надёжность технологического обеспечения шероховатости и износостойкости поверхностей деталей инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов: автореферат дис. ... доктора Технические науки: 05.02.08 / Нагоркин Максим Николаевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»], 2020.

209. Нагоркин, М. Н. Оценка влияния технологической наследственности на процесс формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием / М. Н. Нагоркин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – № 5. – С. 125-130.

210. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Одинцов Л.Г. – Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

211. Олейник О. А. Лекции об уравнениях с частными производными / О. А. Олейник. – Москва: Бином, 2005.– 60 с.

212. П.Д. Кривий, В.В. Крупа, Н.М. Тимошенко, А.І. Гураль. Математичні моделі регулярних микрорельєфів на робочих евольвентних поверхнях циліндричних прямозубих коліс. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27–28 листоп. 2019.), Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. с.100-101.

213. Павловський М. А. Теоретична механіка. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.

214. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

215. Патент на винахід № 112248, Україна. Спосіб визначення впливу подачі на шорсткість оброблюваної поверхні різанням / Кривий П.Д., Дзюра В.О., Грицай І.С., Яцюк В.А., заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201503041. Заявл. 02.04.2015, Опубл. 10.08.2016, бюл. № 15. – 13с.

216. Патент на винахід № 114667. Дворіздева адаптивна розточувальна головка. Україна МПК В23В 29/03 (2006.01), С2 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201510127. Заявл. 16.10.2015, Опубл. 10.07.2017, бюл. № 13. – 10с.

217. Патент на винахід № 118890, Україна МПК В24В 39/00. Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням. Дюра В.О. (2017.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201702296. Заявл. 13.03.2017, Опубл. 25.03.2019, бюл. № 6. – 19с.

218. Патент на винахід №108691. Інструмент для чистового фінішного оброблення зовнішніх циліндричних поверхонь. Україна МПК В24В 39/04 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а 201311875. Заявл. 09.10.2013, Опубл. 25.05.2015, бюл. № 10. – 9с.

219. Патент на корисну модель 99316. Дворіздева розточувальна головка. Україна В23В 29/03 (2006.01)), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – u201414109. Заявл. 29.12.2014., Опубл. 25.05.2015., Бюл. №10 – 8с.

220. Патент на корисну модель № 103173., Інструмент для чистового фінішного оброблення циліндричних поверхонь. Україна МПК (2015.01) В24В 39/00, заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u2015 04499. Заявл. 08.05.2015., Опубл. 10.12.2015, Бюл.№ 23.

221. Патент на корисну модель № 105545. Валик для дослідження шорсткості оброблюваної поверхні. Україна МПК G01N 33/20 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u 2015 09039. Заявл. 21.09.2015., Опубл. 25.03.2016, Бюл.№ 6. – 5с.

222. Патент на корисну модель № 106945. Дворіздева розточувальна головка з торсіонним гасником коливань. Україна МПК (2015.01) В23В 29/03, заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u 2015 11856. Заявл. 30.11.2015., Опубл. 10.05.2016, Бюл.№ 9. – 9с.

223. Патент на корисну модель № 10734. Україна. МПК В24В 39/00 (2009). Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу / Киричок П.О., Хмілярчук О.І. заявник і власник патенту Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – № и200505560. Заявл. 10.06.2005, Опубл. 15.11.2005, бюл. № 11

224. Патент на корисну модель № 109558. Спосіб формування регулярного мікрорельєфу на частково-циліндричних поверхнях. Україна МПК (2016.01) В23В 29/0

B24B 39/00 B21H 3/00, заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u 2015 02385. Заявл. 30.11.2015 12.03.2016., Оpubл. 25.08.2016, Бюл.№ 16. – 4с.

225. Патент на корисну модель № 111018. Спосіб визначення впливу кривизни на шорсткість обробленої поверхні. Україна. МПК (2015.01) G01B 21/30, заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u 2016 04782. Заявл. 28.04.2016., Оpubл. 25.10.2016, Бюл.№ 20. – 16с.

226. Патент на корисну модель № 121078. Самоцентруючий трикулачковий патрон. Україна МПК B23B 31/02 (2006.01), B23B 31/10 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201705783. Заявл. 12.06.2016, Оpubл. 27.11.2017, бюл. № 22. – 4с.

227. Патент на корисну модель № 121381. Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням. Україна МПК B24B 39/00 (2017.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u 2017 02298. Заявл. 13.03.2017, Оpubл. 11.12.2017, бюл. № 23. – 19с.

228. Патент на корисну модель № 129762, Україна МПК G01B 21/30 (2006.01). Спосіб вимірювання шорсткості циліндричної поверхні. Дзюра В.О. Кривий П.Д., Апостол Ю.О., Тимошенко Н.М. № u 2018.05.305. Заявл. 14.05.2018, Оpubл. 12.11.2018, бюл. № 21. – 5с.

229. Патент на корисну модель № 139790, Україна МПК B24B 39/00 (2006.01). Спосіб формування частково-регулярного мікрорельєфу на циліндричних поверхнях вібраційним обкочуванням заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201905989. Заявл. 30.05.2019, Оpubл. 27.01.2020, бюл. № 2. – 5с.

230. Патент на корисну модель № 55748. Україна. МПК B24B 39/00 (2009). Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу / Киричок П.О., Лотоцька О.І. заявник і власник патенту Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – № u201006779. Заявл. 01.06.2010, Оpubл. 27.12.2010, бюл. № 24

231. Патент на корисну модель № 94045. Головка для формування регулярних мікрорельєфів вібраційним обкочуванням. Україна МПК (2014.01) B24B 39/00, заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u2014 05285. Заявл. 19.05.2014., Оpubл. 27.10.2014, Бюл.№ 20. – 5с.

232. Патент на корисну модель №101187. Дворіцева розточувальна головка. Україна МПК B23B 29/03 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний

технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201503042. Заявл. 02.04.2015., Опубл. 25.08.2015, бюл. №16.

233. Патент на корисну модель №86461. Інструмент для чистової обробки поверхневим пластичним деформуванням. Україна МПК В24В 39/04 (2006.01), заявник і власник патенту Кривий П.Д., Кашуба Н.П., Дзюра В.О., Кобельник В.Р. – № u201309722. Заявл. 05.08.2013., Опубл. 25.12.2013, бюл. № 24. – 5с.

234. Патент на корисну модель №93918. Дворіцева розточувальна головка. Україна МПК В23В 29/03 (2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u2014 03726. Заявл. 10.04.2014., Опубл. 27.10.2014, бюл. № 20. – 7с.

235. Патент на корисну модель №94017. Дворіцева розточувальна головка. Україна МПК В23В 29/03(2006.01), заявник і власник патенту Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u 2014 04963. Заявл. 12.05.2014., Опубл. 27.10.2014, Бюл.№ 20– 7с.

236. Перестюк М.О. Деякі сучасні аспекти асимптотики теорії диференціальних рівнянь з імпульсною дією / Перестюк М.О., Чернікова О.С. // Укр. мат. журн. – 2008. – 60, с. 81-90.

237. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / [К. Хартан, Э. Лецкий, В. Шефер и др.] ; [перевод с немецкого].– М. : Мир, 1977. – 552 с.

238. Погодаев В.П. Технологическое обеспечение параметров поверхностей с частично регулярным микрорельефом деталей пар трения [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08 - Технология машиностроения / В. П. Погодаев ; ОмГТУ. – Омск, 2004. – 16 с.

239. Попандопуло К.Х. Формирование качественных показателей поверхностного слоя, гильз цилиндров двигателя ЗМЗ-53, при его раскатывании методом осциллирующих переменных давлений / К.Х. Попандопуло, В.В. Усов, А.С. Личковаха // Технологии и средства повышения надежности машин в АПК. - зерноград, 2006. - Вып. 2. -С. 52-58.

240. Прогрессивные инструменты для обработки отверстий поверхностным пластическим деформированием роликами / Г. С. Жетесова, Я. Н. Отений , О. П. Муравьев Ю. О. Муравьева // Горно-металлургический комплекс Казахстана: проблемы и перспективы инновационного развития : тр. Междунар. науч.-практ. конф., посв. 20-летию Независимости Казахстана, г. Караганды, 29-30 нояб. 2011г. Ч. 2 / Министерство образования и науки Республики Казахстан, Карагандинский государственный технический университет. - Караганда, 2011. - С. 179-182.

241. Проскуряков Ю.Г. и др. Объемное дорнование отверстий / Ю.Г. Проскуряков, В.Н. Романов, А.Н. Исаев – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

242. Проскуряков Ю.Г. Чистовая обработка деталей пластическим деформированием [Текст] / Ю. Г. Проскуряков, А. И. Осколков, Б. Г. Шаповалов [и др.]. – Барнаул : Алт. кн. изд-во, 1969. – 105 с.
243. Проскуряков Ю.Г., Шельвинский Г.И. Дорнование цилиндрических отверстий с большими натягами. – Ростов н/Д: РГУ, 1982. – 166 с.
244. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 330 с.
245. Романовский П.И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. преобразования Лапласа [Текст] / П.И. Романовский.- М.: Наука, 1980.- 336 с.
246. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. – М.: Машинстроение, 1979. Библиотека технолога. – 176 с.
247. Свідоцтво № 100743 Україна. Комп'ютерна програма. «Моделювання реалізації мікрорельєфу» . Я.В. Литвиненко, П.О. Марущак, В.О. Дзюра; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.
248. Свідоцтво № 96138 Україна. Комп'ютерна програма “Визначення параметрів мікронерівностей поверхні металів. «Analiz relefu»/ Я.В. Литвиненко, П.О. Марущак, В.О. Дзюра; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.
249. Справочник контролера машиностроительного завода. Допуски, посадки, линейные измерения. Под ред. А.И. Якушева. 2-ое издание. М., "Машиностроение", 1970
250. Справочник контролера машиностроительного завода. Под ред. А.И. Якушева. 3-ое издание. – М.: Машиностроение, 1980. - 527 с.
251. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х т. Т.1 / Под. ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с.
252. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин обработкой пластическим деформированием / Приложение №8 к журналу «Справочник. Инженерный журнал» №8 – 2003.
253. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховалость, волнистость, профиль. Международный опыт. / Под. ред. канд. техн. наук Н.А. Табачниковой. СПб.: Политехн. ун-та., 2007, 136 с.
254. Ткачук А.А., Заблоцкий В.Ю., Дзюра В.О. Підвищення зносостійкості фрикційних поверхонь обертання методами поверхневого пластичного деформування. Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – №5 (2). - с. 158-163.

255. Точность производства в машиностроении и приборостроении. Под ред. А.И. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567с.
256. Фельдман Я.С. Расчет параметров микрорельефа цилиндрических вибронакатанных поверхностей деталей машин, приборов и их технологическое обеспечение / Я.С. Фельдман. – Л.: ЛИТМО, 1979. – 97 с.
257. Феодосьев В.И., Соппротивлени материалов: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1970. – 544 с.
258. Филоненко С.Н. Резание металлов / С.Н. Фмлоненко. – К.: Техника, 1975. – 232 с.
259. Функциональная взаимозаменяемость в машиностроении [Текст] : научное издание / Ю. Н. Ляндон ; общ. ред. А. И. Якушев. М. : Машиностроение, 1967. 219 с.
260. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах [Текст] / Г. Хан, С. Шапиро. М.: Мир, 1969. – 395 с.
261. Хмілярчук О. І. Пристрої та інструмент для виконання віброобробки на деталях поліграфічного обладнання / О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства. – 2006. – № 1–2 (11–12). – С.133–137.
262. Хусу А. П. Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов. / М. : Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975. – 344 с.
263. Ціж Б.Р., Сокіл Б.І., Сокіл М. Б. Теоретична механіка: Підручник: – Львів: Сполом, 2008. – 458 стор.
264. Чирков Г.В. Технология получения высококачественных поверхностей отверстий в деталях автомобильных двигателей и других механизмов / Г.В. Чирков // Двигателестроение. - 2001. - №3. - С. 14-15.
265. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1972. – 241 с.
266. Шнейдер Ю.Г. Инструмент для чистовой обработки металлов давлением. – Л.: Машиностроение, 1971. – 134 с.
267. Шнейдер Ю.Г. Исследование влияния маслоёмкости рабочих поверхностей гильз цилиндров автомобильных двигателей на их прирабатываемость / Ю.Г. Шнейдер, Г.Г. Лебединский // Упрочняюще-калибрующие и формообразующие методы обработки деталей. - Ростов-на-Дону, 1970. - С.92-93.
268. Шнейдер Ю.Г. Регуляризация и упрочнение поверхностей деталей машин / Вестник машиностроения. 1984. 12. – с. 18-20.
269. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным

- микрорельефом. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Ю.Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1982. – 248с.
270. Экимов В. В. Вероятностные методы в строительной механике корабля / Екимов В.В. – «Судостроение».– Ленинград, 1966. – 328с.
271. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник. – 5-е изд. перераб. и доп. / А.И. Якушев – М.: Машиностроение, 1979. – 343с.
272. Ящерицын П.И., Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Авелчеников. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256с.
273. Sotnykov O., Rodionov M., Maruschak P., Brezinová J., Guzanová A. and Apostol Y., Failure analysis of the hingelever mould oscillator bearings of the continuous casting machine, *Strength, Fracture and Complexity*, 2014, Vol. 8, No. 3, pp. 135-143.
274. Maruschak P.O., Panin S.V., Zakiev I.M., Poltaranin M.A., Sotnikov A.L. Scale levels of damage to the raceway of a spherical roller bearing, *Engineering Failure Analysis*, 2016, 59, pp. 69-78.
275. 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, *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 2017, 30(8), pp. 1170-1175.
276. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 298 с., Т. 2. 320 с.
277. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий. - Томск: Изд-во ТПУ, 2008. - 285 с.
278. Марущак П.О., Панин С.В., Студент А.З., Овечкин Б.Б. Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей / Отв. ред. В.Ф. Пичугин. - Томск: Изд-во ТПУ, 2013. - 236 с.
279. В.А. Сидоров, А.Л. Сотников Определение технического состояния механизмов качания МНЛЗ // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2004. - №.8. - С. 202-205.
280. Сидоров В.А. Метод оперативного контроля соосности кристаллизатора с технологической осью ручья МНЛЗ /В.А.Сидоров, А.Л. Сотников // *Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия" ОАО "Черметинформация"*. – 2006. – №9. – С. 38-41.
281. Сотников О.Л. Попередження відхилень параметрів коливального руху кристалізатора МБЛЗ на основі розвитку методів діагностики механізму хитання: Дис... канд. наук, 2008. - Донецьк, ДНТУ. – 22 с.

282. Сотников О.Л. Діагностування підшипників важільного механізму хитання кристалізатора МБЛЗ // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія техн. науки. – 2010. – Вип. 21. – С. 89-94.
283. Sotnikov A., Olshevsky A., Sholomitskii A. Strength and Durability Study of CCM Mold Oscillation Mechanism in Different Operating Modes. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, 2021, pp. 537-547, https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_62
284. Панин В. Е., Колубаев А. В., Слосман А. И., Тарасов С. Ю., Панин С. В., Шаркеев Ю. П. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики // Физическая мезомеханика – 2000 – Т.3. – №1. – С. 67–74.
285. Панин С.В., Корниенко Л.А., Пувадин Т., Мержиевский Л.А., Шилько С.В., Полтаранин М.А., Иванова Л.Р., Коробейников М.В., Штарклев Е.А. Трение и изнашивание сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного высокоэнергетической обработкой поверхности электронным пучком // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – №12. – С.125-131.
286. Панин В.Е., Панин А.В.. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7-15.
287. Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V., Yelovoy O.M., Tyurin S.A., Komissarov V.V., Shcherbakov S.S. Methods and main results of tribo-fatigue tests // International Journal of Fatigue. – 2014. - Vol. 66. – P. 207–219.
288. Sosnovskii L.A., Komissarov V.V., Shcherbakov S.S. A method of experimental study of friction in a active system // J. Frict. Wear. – 2012. – Vol. 33. – P. 136–145
289. Игнатович С.Р., Борисов Д.И., Закиев И.М., Юцкевич С.С. Исследование микропластического деформирования при усталости методом склерометрии / Авиационно-космическая техника и технология – Вип. 8 (24) – Харьков: ХАИ, 2005 – С. 81-84.
290. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Борисов Д.И., Закиев В.И. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении методами наноиндентирования и наносклерометрии // Пробл. прочности. - 2006. - № 4. - С. 132-139.
291. Ерохин М.Н., Пастухов А.Г. Анализ математических моделей долговечности карданных передач транспортных и технологических машин // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2014. -№1. - С. 11-26.

292. Релаксационная способность и трещиностойкость азотистого покрытия, полученного электронно-лучевой наплавкой порошка стали 60X24AG16 при высоконагруженном изнашивании твердым абразивом / Тагильцева Д.Н., Наркевич Н.А., Шулепов И.А., Моисеенко Д.Д // Трение и износ. – 2014. – Т. 35. – № 2. – С. 142-150.
293. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода // Физ. мезомех. – 2006 – Т. 9. – № 3. – С.9-22.
294. Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. Формирование полос локализованного сдвига в поверхностных слоях металлов при трении // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – № 5. – С. 811-814.
295. Львова Н.А., Кравчук К.С., Широков И.А. Алгоритмы обработки изображений царапин в методе склерометрии // Физика твердого тела. – 2013 – Т. 55. – Вып. 8. – С. 1570-1577.
296. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. Неоднородность деформации и сдвиговая неустойчивость материала при трении // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11 (3). – С. 215-220.
297. Колубаев А. В., Тарасов С. Ю. Закономерности формирования поверхностных структур при трении с высокими нагрузками // Трение и износ. – 1998 (19) – № 3 – С. 379-385
298. Колубаев А.В., Тарасов С.Ю., Сизова О.В., Колубаев Е.А., Иванов Ю.Ф. Эволюция структуры поверхностного слоя металлов в условиях трения скольжения // Трение и износ. – 2007. – Т. 28. – № 6. С. 582-590.
299. Phaner-Goutorbe M., Barthou C., Porte L., Vannes B. Scanning tunneling microscopy study of wear induced by false brinelling on rolling bearings // Applied Surface Science, 1997, 108 (1), pp. 45-51.
300. Костецкий Б.И., Носовский Н.Г., Караулов А.К., Бершадский Л.Н. и др. Поверхностная прочность материалов при трении, Киев: Техніка, 1976. – 296 с.
301. Ивченко Л. И., Цыганов В. В., Закиев И. М. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, № 1. – С. 500-509.
302. Lytvynenko I., Maruschak P., Menou A. Using mathematical model of cyclic random process for diagnostics of nanotitanium surface condition after high-energy treatment // Proc. of International Symposium on Operational Research and Applications (May 8-10). – 2013. – Morocco, Marrakech. – P. 678-684.

303. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A. Processing and modeling of ordered relief at the surface of heat-resistant steels after laser irradiation as a cyclic random process // Automatic Control and Computer Sciences – 2014 – Vol. 48 – Issue 1 – P. 1-9.
304. C.R. Gagg, P.R. Lewis Wear as a product failure mechanism – Overview and case studies // Engineering Failure Analysis, 2007, Vol. 14, Issue 8, P. 1618-1640
305. I. El-Thalji, E. Jantunen A descriptive model of wear evolution in rolling bearings // Engineering Failure Analysis, 2014, Vol. 45, P. 204-224.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ КЛАСУ «ТІЛА ОБЕРТАННЯ»	10
1.1 Аналіз об'єктів дослідження та технічних вимог до них	10
1.2 Аналіз технологічних методів та засобів забезпечення якісних параметрів поверхонь деталей класу «тіла обертання»»	19
1.3 Аналіз результатів досліджень забезпечення параметрів якості поверхонь деталей машин	25
РОЗДІЛ 2	
ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ КЛАСУ «ТІЛА ОБЕРТАННЯ»	36
2.1 Технологічна спадковість і точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь гідروциліндрів	36
2.2 Оптимізація технологічного процесу формування поверхні гідроциліндра на основі аналізу топографії її мікрорельєфу утвореного на різних операціях	49
2.3 Імовірно-статистичний метод оцінювання впливу подачі на шорсткість поверхні сформованої точінням	63
2.4 Імовірно-статистичний метод оцінювання впливу форми та розмірів на шорсткість поверхні сформованої токарною обробкою	78
2.5 Спосіб аналітичного опису профілю поверхні	89
	98

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ

- | | | |
|-----|--|-----|
| 3.1 | Розрахунок параметрів дворіцевої адаптивної розточувальної головки | 98 |
| 3.2 | Конструювання нових конструкцій адаптивних розточувальних головок | 111 |
| 3.3 | Спосіб вимірювання шорсткості циліндричних поверхонь | 113 |

РОЗДІЛ 4

ФРАКТОДІАГНОСТУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКА КОЛИВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ МАШИНИ БЕЗПЕРЕВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

- | | | |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Аналіз впливу умов роботи обладнання на умови його зношування | 120 |
| 4.2 | Комплексне оцінювання пошкоджень поверхонь підшипника коливального механізму МБЛЗ | 123 |

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

140

Дзюра В.О., Марущак П.О.

**ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ТА ЇХ
ПРОФІЛОМЕТРИЧНИЙ КОНТРОЛЬ**

Монографія

Г 27 Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль / В.О. Дзюра, П.О. Марущак. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. – 170 с.

ISBN 978-617-7875-23-8

Підписано до друку 21.10.2021. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно–друк. арк. 10,63. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 21102021

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.