

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Федорчук Анатолій Михайлович**

**УДК 621.31**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ  
СКЛАДНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А.М. Федорчук

**Керівник роботи**

Грабар І.Г.

д.т.н., професор

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Федорчук Анатолій Михайлович. Підвищення довговічності робочих органів складних сільськогосподарських машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі встановлено, що між параметрами шорсткості мають місце тісні кореляційні зв'язки для всіх досліджуваних технологічних систем (ТС). При збільшенні значення коефіцієнта кореляції  $r$  тіснота зв'язків знижується, причому для алмазного вигладжування це зниження більш інтенсивне. Так, при  $r = 0,9$  для ТС торцевого фрезерування композитом 10 у графі кореляційних зв'язків параметрів шорсткості є одна ізольована вершина (b), а для ТС торцевого фрезерування композитом 10 з наступним АВ – п'ять вершин ( $b$ ,  $v$ ,  $\rho$ ,  $\Delta$ ,  $\Delta H$ ). Аналіз мікрофотографій поверхонь зразків з чавуну, оброблених алмазним вигладжуванням, показав, що на збільшення їх суцільності надають зниження значень параметрів шорсткості поверхні, отриманих на попередніх етапах обробки, та збільшення сили алмазного вигладжування.

Встановлено, що надійність ТС забезпеченням різних параметрів шорсткості поверхонь змінюється в широких межах. Так, для висотних параметрів у діапазоні відхилень  $\delta = 0,2$  ймовірність їхнього забезпечення змінюється в межах: а) для торцевого фрезерування композитом 10 від  $0,45 R_p$  до  $0,88 R_z$ ; б) для торцевого фрезерування композитом 10 з наступним АВ від  $0,53 R_p$  до  $0,72 R_a$ ; в) для точіння композитом 10 циліндричних поверхонь від  $0,52$  для  $R_{max}$  до  $0,65$  для  $R_p$ ; г) для АВ після точення композитом 10 та нанесення м'яких приробіткових плівок від  $0,83$  для  $R_a$  та  $R_p$  до  $0,95$  для  $R_z$  та  $R_{max}$ .

*Ключові слова: технологічна система, шорсткість, довговічність, надійність*

## ANNOTATION

**Fedorchuk Anatoliy Mykhailovych.** Increasing the Durability of Working Bodies of Complex Agricultural Machinery. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

In the master's thesis it is established that there are close correlations between the roughness parameters for all studied technological systems (TS). As the value of the correlation coefficient  $r$  increases, the tightness of the bonds decreases, and for diamond smoothing this decrease is more intense. Thus, at  $r = 0.9$  for the vehicle end milling composite 10 in the graph of correlations of roughness parameters there is one isolated vertex ( $b$ ), and for the vehicle end milling composite 10 followed by AB - five vertices ( $b, v, \rho, \Delta, \Delta H$ ). Analysis of photomicrographs of surfaces of cast iron samples treated with diamond smoothing showed that to increase their continuity provide a decrease in the values of surface roughness parameters obtained in the previous stages of processing, and increase the strength of diamond smoothing.

It is established that the reliability of the vehicle by providing various parameters of surface roughness varies widely. Thus, for height parameters in the range of deviations  $\delta = 0.2$ , the probability of their provision varies within: a) for end milling with composite 10 from 0.45  $R_p$  to 0.88  $R_z$ ; b) for end milling with composite 10 followed by AB from 0.53  $R_p$  to 0.72  $R_a$ ; c) for turning the composite 10 cylindrical surfaces from 0.52 for  $R_{max}$  to 0.65 for  $R_p$ ; d) for AB after turning with composite 10 and application of soft production films from 0.83 for  $R_a$  and  $R_p$  to 0.95 for  $R_z$  and  $R_{max}$ .

*Key words: technological system, roughness, durability, reliability.*

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 5  |
| РОЗДІЛ 1. ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ<br>ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....      | 10 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНЕ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ<br>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....                              | 20 |
| РОЗДІЛ 3. ПАРАМЕТРИЧНА НАДІЙНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ<br>ОБРОБКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ІЗ СТАЛІ 45..... | 43 |
| ВИСНОВКИ.....   | 52 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....   | 53 |

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Однією з основних завдань сучасного машинобудування є забезпечення високої надійності техніки під час експлуатації. Вирішення цього завдання пов'язане з удосконаленням та впровадженням нових ефективних технологічних процесів виготовлення продукції, автоматизацією систем конструкторської та технологічної підготовки виробництва, автоматизацією процесів контролю та діагностики якості продукції та ін.

Одним із напрямків підвищення якості та надійності продукції є застосування високопродуктивних технологій обробки поверхонь деталей машин, до яких відносяться високошвидкісна обробка різанням інструментами із синтетичних надтвердих матеріалів (СНТМ), обробно-зміцнююча обробка (ОЗО) поверхневим пластичним деформуванням (ППД), зокрема, алмазне вигладжування (АВ) та ін.

Застосування таких технологій забезпечує високу надійність технологічних систем і високу точність і якість поверхонь деталей, що, своєю чергою, дозволяє значно підвищити якість продукції.

Тому, при вирішенні питань підвищення якості та експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин актуальними є дослідження можливостей технологічних систем обробки різанням та ППД поверхонь деталей із застосуванням інструментів із СНТМ.

Дослідження щодо впливу на процеси формування параметрів якості та експлуатаційних властивостей деталей машин різних технологічних методів обробки та їх умов ведуться за двома напрямками:

- 1) визначення ступеня впливу умов обробки поверхонь деталей з їхньої експлуатаційні характеристики;

- 2) формування експлуатаційних властивостей у процесі обробки поверхонь деталей.

Другий напрямок є більш перспективним. Ефективність запровадження нової технології обробки деталей залежить від повноти інформації про її технологічні можливості. Відсутність необхідних відомостей у науковій та довідковій літературі ускладнює цей процес. Нерідко відомості про різні методи обробки мають загальний рекомендаційний характер і не дають змоги прогнозувати результати обробки.

Аналіз літературних джерел показав, що для таких методів обробки поверхонь деталей з конструкційних матеріалів (сталь, чавун), як лезова обробка точінням або фрезеруванням із застосуванням СНТМ, алмазне вигладжування та ін., відчувається нестача математичних моделей впливу умов обробки (режими, параметри якості поверхневого) шару (ПКПС) після попередньої обробки та ін.) формування параметрів якості поверхонь оброблюваних деталей.

Це ускладнює технологічну підготовку виробництва з використанням сучасних вискоєфективних систем автоматизованого проектування технологічних процесів механічної обробки поверхонь деталей.

Для технолога важливим є знання можливості будь-якої технологічної системи (ТС) забезпечити необхідні показники якості деталі з максимальною (заданою) надійністю.

Функціонуюча ТС в певних умовах може бути непрацездатною, якщо вона не зможе з високою ймовірністю забезпечити необхідні параметри якості в заданих діапазонах їхньої зміни. Тому для виготовлення продукції з високими показниками якості та надійності необхідно забезпечити високу надійність самої ТС.

ДСТУ регламентує показники надійності технологічних систем, у тому числі ймовірність виконання ТС завдання, або ймовірність того, що в інтервал часу, що розглядається, якість і кількість випускається ТС придатної продукції і витрати на її виготовлення відповідатимуть вимогам нормативно-технічної або конструкторської документації.

Відповідно до ДСТУ надійність ТС може оцінюватися за параметрами якості продукції, за параметрами продуктивності ТС і за параметрами ресурсів на виготовлення продукції.

В даний час у науковій та довідковій літературі є дуже обмежена інформація щодо параметричної надійності ТС формування параметрів якості поверхонь чистовими та фінішними методами обробки.

У зв'язку з цим при вирішенні завдань технологічного забезпечення заданих параметрів якості поверхонь деталей машин та їх експлуатаційних властивостей безумовну актуальність набуває проблема дослідження можливостей чистових та фінішних ТС лезової обробки інструментами з ССТМ та ППД АВ (поряд з іншими ТС) та визначення їх параметричної надійності за необхідними показниками якості інженерними методами

Ступінь розробленості наукової проблеми. Аналіз застосовуваних практично підходів до реалізації технологічних процесів чистової і фінішної обробки деталей, літературних джерел і нормативно-технічної документації показав, що:

- недостатньо регламентовані вимоги до призначення технологічних значень параметрів шорсткості поверхонь деталей у технологічній документації;
- відсутні єдина науково-обґрунтована методологія та інженерні методи визначення параметричної надійності ТС чистової та фінішної обробки деталей за параметрами шорсткості та зносостійкості оброблених поверхонь;
- відсутні рекомендації щодо реалізації технологій обробки поверхонь деталей, у тому числі у комп'ютеризованих ТС з можливістю управління зміною параметрів якості в межах технологічного переходу, а також метрологічного забезпечення.

Це дозволяє констатувати актуальність та необхідність подальших досліджень у цьому напрямку.

**Мета та завдання дослідження** Мета роботи: вирішення проблеми дослідження та підвищення надійності технологічного забезпечення параметрів

шорсткості та зносостійкості поверхонь деталей при чистовій та фінішній обробці інструментами із синтетичних надтвердих матеріалів інженерними методами, розробленими з урахуванням результатів технологічних досліджень.

**Завдання досліджень:**

1. Визначити вплив параметрів шорсткості поверхонь деталей трибоспряжень сільськогосподарських машин на їх надійність;
2. Розробити технологію обробки поверхонь деталей, у тому числі у комп'ютеризованих ТС з можливістю управління зміною параметрів якості в межах технологічного переходу.

**Об'єкт дослідження** – чистові та фінішні стадії технологічних процесів обробки інструментами, оснащеними синтетичними надтвердими матеріалами, плоских та циліндричних поверхонь деталей, що працюють у трибо спряженнях сільськогосподарських машин.

**Предмет дослідження** – взаємозв'язки, закономірності та параметрична надійність процесів технологічного забезпечення геометричних параметрів якості та зносостійкості поверхонь деталей машин на стадіях чистової та фінішної обробки лезовими та зміцнюючими інструментами, оснащеними синтетичними надтвердими матеріалами.

**Методи дослідження.** При виконанні роботи використовувалися загальноприйняті принципи та теорії, що застосовуються при вирішенні науково-дослідних та виробничих завдань. При збиранні інформації та обробці отриманих результатів використовувалися класичні методи статистики. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах із застосуванням верстатного обладнання та сучасних вимірювальних систем з використанням методів планування експерименту та кореляційного аналізу. Обробка результатів експериментальних досліджень проводилася з використанням стандартних і авторських програм.



### **Перелік публікацій за темою роботи:**

1. **Федорчук А.М.** Параметри якості, що визначають експлуатаційні властивості поверхневого шару деталей машин. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 30-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 260-261.

2. Савченко В.М., Шклярчук Ю.П, Бугайчук В.В, **Федорчук А.М.**, Губерт Н.В Вплив абразивних властивостей ґрунтів на інтенсивність зношування робочих органів. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (м. Бахмут, 25-26 листопада 2021 р.) / Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Української інженерно-педагогічної академії [упоряд. П.О. Чикунів]. Бахмут: ННППІ УПА. 2021. С. 114-115.

3. Грабар І.Г. **Федорчук А.М.**, Примаць М.А., Кулак Д.А., Шуляр І.В. Стійкість до абразивного зношування покриття на основі порошку STELLITE 6. Матеріали МНПК «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» – Харків: ДБТУ, 2021. С. 551-554.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств представляє запропоноване технологічне забезпечення параметрів шорсткості та зносостійкості поверхонь деталей при чистовій та фінішній обробці інструментами із синтетичних надтвердих матеріалів інженерними методами.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 34 сторінки комп'ютерного тексту, містить 24 рисунки і 2 таблиці.

## РОЗДІЛ 1

### ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Вплив геометричних параметрів якості на експлуатаційні показники сполук деталей розглядається в теорії контактування твердих тіл, основні положення якої було розроблено у 30-х роках ХХ століття. У молекулярно-механічній теорії тертя та зносу, запропонованої Крагельським І. В. у 1939 р., враховується дискретність контакту двох тіл, пов'язаної з наявністю шорсткості, хвилястості та макровідхилень поверхонь.

Подальший розвиток теорія контактної деформації отримала у роботах Галина Л. А. [5], Лур'є А. І., Мухелішвілі Н. І., Штаєрмана І. Я та ін. моделі шорсткості у вигляді пірамід (Хісакадо), конусів (Лінг, Яшимото), циліндрів (Лінкольн).

У роботах Рижова Е. Ст окремі мікронерівності представлені у вигляді еліпсоїдів, вершини яких характеризуються поздовжнім і поперечним радіусами закруглення, хвилястість поверхні моделюється еліпсоїдами і циліндрами, макронерівності вважаються описаними параболою [11]. Надалі ці теоретичні передумови були розвинені в працях Дьомкіна Н. Б., Максака В. І., Міхіна Н. М., Рудзіта Я. А., Сулова А. Г. та ін.

Дослідження вітчизняних та зарубіжних вчених (Галина Л. А., Дьомкіна Н. Б., Дьяченко П. Є., Крагельського І. В., Лур'є А. І., Максака В. І., Міхіна Н. М., Мухелішвілі Н. І., Рудзіта Я. А., Рижова Е. В., Суліми А. М., Сулова А. Г., Штаєрмана І. Я. та ін) показують, що на експлуатаційні зміни поверхневих шарів впливають геометричні параметри та фізикомеханічні властивості поверхонь. Питання визначення раціональної системи параметрів якості поверхонь деталей, що відображає повною мірою їх властивості, розглянуті у роботах Біліка Ш. М., Вітенберга Ю. Р., Демкіна Н. Б., Дуніна-Барковського І. В., Дьяченко П. Є., Комбалова Ст С., Крагельського І. Ст, Лоповка Т. С.,

Маталіна А. А., Рудзіта Я. А., Рижова Е. В., Суліми А. М., Сусллова А. Г., Хусу А. І., Шнейдера Ю. Г. та ін.

У роботах цих та інших вчених пропонується безліч параметрів, що характеризують стан поверхневого шару деталей та обґрунтовується їх вплив на експлуатаційні властивості з'єднань деталей.

У роботах Сусллова А. Р. показано, наприклад, що для розрахунків контактної жорсткості досить мати таку систему параметрів шорсткості:  $R_a$ ,  $R_{max}$ ,  $R_p$ ,  $t_m$ ,  $S_m$  і  $S$ , якими можуть бути визначені значення параметрів  $b$ ,  $v$ ,  $tp$ ,  $\rho_m$ ,  $\Delta$ , що характеризують несучу здатність шорсткості. Також у цих роботах є дані щодо розрахунку параметрів контактної взаємодії аналітичними та аналітико-експериментальними методами. Аналітичні розрахункові залежності включають до 20 і більше параметрів якості поверхонь двох поверхонь, що контактують, багато з яких носять імовірнісний характер і мають досить складне метрологічне забезпечення, що ускладнює використання таких залежностей для виробничих цілей.

Для аналітико-експериментальних залежностей досліджувані фактори вибираються на основі аналізу фізичних явищ, що відбуваються під час контактування поверхонь, а параметри моделей визначаються за результатами активних експериментів, які проводяться методами математичної статистики.

У роботі Сусллова А. Р. визначено 25 параметрів якості поверхневого шару деталей, що впливають на їх експлуатаційні властивості:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $S$ ,  $tp$ ,  $R_p$ ,  $v$ ,  $b$ ,  $\rho_m$ ,  $\Delta$ ,  $W_z$ ,  $W_{max}$ ,  $S_{mw}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_p$ ,  $H_{\mu 0}$ ,  $h_n$ ,  $\sigma_{ocm}$ ,  $h_b$ ,  $I_b$ ,  $\rho_D$ ,  $C_\phi$ ,  $I$ ,  $\phi$ .

Метрологічно забезпеченими є 16 показників:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $tp$ ,  $R_p$ ,  $W_z$ ,  $W_{max}$ ,  $S_{mw}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{\mu 0}$ ,  $h_n$ ,  $\sigma_{ocm}$ ,  $I_b$ ,  $C_\phi$ ,  $I$ . Також визначено технологічно керовані параметри якості:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $R_p$ ,  $W_z$ ,  $W_{max}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{\mu 0}$ ,  $h_n$ ,  $\sigma_{ocm}$ .

Науково обґрунтований підхід до нормування якості поверхонь деталей пропонує для нормування параметри  $R_a$ ,  $S_m$ ,  $R_p$ ,  $W_z$ ,  $S_{mw}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{\mu 0}$ , що вказує на недосконалість чинних стандартів, що регламентують параметри якості поверхневого шару деталей.

У роботі Без'язичного В. Ф. вказується, що в даний час немає єдиної думки щодо ступеня впливу параметрів поверхневого шару (шорсткості, залишкової напруги та наклепу) на ряд експлуатаційних властивостей.

Пропонуються залежності, які дозволяють призначити значення факторів процесів обробки деталей, що дозволяють забезпечити задані експлуатаційні характеристики. Це підтверджує актуальність розробки моделей залежності процесів формування експлуатаційних характеристик поверхонь деталей від керованих факторів технологічних процесів на основі фізико-статистичного підходу.

Нині під керівництвом проф. Сулова А. Г. активно розвивається науковий напрямок про інженерію поверхні, дослідження в якому ведуться за п'ятьма напрямками:

1) визначення оптимальної форми та якості поверхневого шару деталей машин, виходячи з їх функціонального призначення, що передбачає встановлення взаємозв'язку ЕС поверхонь деталей та їх з'єднань з ПКПС;

2) технологічне забезпечення необхідної форми та якості поверхневого шару деталей з найменшою собівартістю, що передбачає фізичний та математичний опис процесів формування ПКПС;

3) дослідження механізму технологічного успадкування форми та якості поверхневого шару деталей та їх зміни при експлуатації для формування рівноважної шорсткості в процесі опрацювання;

4) модифікація поверхневих шарів деталей, заснована на застосуванні методів нанесення покриттів, іонної імплантації, плазмового та лазерного легування поверхонь та інших процесів;

5) розробка методів та засобів контролю геометричних та фізикомеханічних параметрів якості поверхневого шару деталей.

У ДСТУ визначено такі показники шорсткості:

$R_a$  - середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості від середньої лінії в межах базової довжини;

$Rz$  - висота нерівностей профілю шорсткості по десяти точках у межах базової довжини;

$Rmax$  - максимальна висота профілю шорсткості в межах базової довжини;

$Sm$  - середнє значення кроку нерівностей профілю шорсткості по середній лінії в межах базової довжини;

$S$  – середнє значення кроку місцевих виступів профілю шорсткості;

$tp$  - відносна опорна довжина профілю шорсткості на рівні  $p$  перерізу профілю.

$\eta_p$  – опорна довжина профілю.

У ДСТУ регламентований алгоритм розрахунку цих геометричних параметрів якості, а також параметрів:

$Rq$  – середнього квадратичного відхилення профілю середньої лінії;

$Rp$  – висоти найбільшого виступу профілю шорсткості;

$Rv$  – глибини найбільшої западини профілю шорсткості;

$\lambda q$  – середньої квадратичної довжини хвилі профілю шорсткості;

$\lambda a$  і  $\lambda q$  – відповідно, середньої та середньої квадратичної довжини хвилі профілю шорсткості;

$l_0$  – відносної довжини профілю шорсткості;

$D$  – щільність виступів профілю шорсткості;

$dy/dx$  або  $tg \alpha_i$  – нахилу профілю або тангенсу кутів нахилу у будь-якій точці профілю шорсткості;

$\Delta a$  і  $\Delta q$  – відповідно, середнього арифметичного та середнього квадратичного значення нахилу профілю шорсткості.

Для оцінки властивостей поверхні широко застосовується крива опорної поверхні (крива Аббота-Файрстоуна), побудована у відносних або абсолютних координатах; параметри  $v$  і  $b$  початкової ділянки кривої опорної поверхні;  $\rho$  – середній радіус кривизни вершини місцевого виступу профілю шорсткості;  $\rho_m$  – середній радіус кривизни виступів профілю шорсткості;  $\Delta$  – безрозмірний комплекс Крагельського-Комбалова та ін.

Також профіль шорсткості розглядається як випадкова функція, що характеризується спектральною щільністю мікропрофілю поверхні, кореляційними функціями та ін.

Хвилястість поверхні оцінюється параметрами, алгоритм розрахунку яких аналогічний алгоритмам розрахунку параметрів шорсткості:

$W_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю хвиль від середньої лінії в межах базової довжини;

$W_z$  – висота нерівностей профілю хвиль по десяти точках;

$W_{max}$  – максимальна висота профілю хвиль;

$W_p$  – висота згладжування хвилястості;

$S_{mw}$  – середнє значення кроку профілю хвиль по середній лінії;

$tp_w$  - відносна опорна довжина профілю хвиль та ін.

Макровідхилення поверхні характеризують такими параметрами, як:

$H_{max}$  – максимальна висота макровідхилення;  $H_p$  – висота згладжування макровідхилення (відстань від середньої лінії профілю до огинаючої).

ДСТУ регламентував відхилення від круглості циліндричних поверхонь: відхилення від круглості  $E_{FK}$ ; середнє арифметичне відхилення від круглості  $E_{FKa}$ ; середнє квадратичне відхилення від круглості  $E_{FKq}$ .

ДСТУ регламентує більшу кількість параметрів для оцінки структури поверхні, а саме шорсткості  $R$ , хвилястості  $W$  та вихідного профілю  $P$  поверхні:  $R_p$ ,  $W_p$ ,  $P_p$  – максимальна висота піку профілю;

$R_v$ ,  $W_v$ ,  $P_v$  – найбільша глибина западини профілю;

$R_z$ ,  $W_z$ ,  $P_z$  – максимальна висота профілю (ідентичний параметру  $R_{max}$  ДСТУ);

$R_c$ ,  $W_c$ ,  $P_c$  – середня висота елементів профілю (ідентичний параметру  $R_z$  ДСТУ);

$R_t$ ,  $W_t$ ,  $P_t$  – загальна висота профілю;

$R_a$ ,  $W_a$ ,  $P_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю, що оцінюється (ідентичний параметру  $R_a$  за ДСТУ);

$Rq, Wq, Pq$  – середньоквадратичне відхилення оцінюваного профілю;

$Rsk, Wsk, Psk$  – асиметрія профілю, що оцінюється;

$Rqu, Wqu, Pqu$  – ексцес профілю;

$RSm, WSm, PSm$  – середня ширина елементів профілю (ідентичний параметр  $Sm$  за ДСТУ);

$RAq, WAq, PAq$  – середньоквадратичний кут нахилу профілю;

$Rmr(c), Wmr(c), Prnr(c)$  – коефіцієнт змінання профілю (ідентичний параметру  $tp$  за ДСТУ);

$Rac, Wac, Pac$  – відмінність висоти зрізу профілю;

$Rmr, Wmr, Pmr$  – відносний коефіцієнт змінання.

Перехід до нової системи регламентації параметрів структури поверхні у виробництві та для проведення наукових досліджень ДСТУ є складним процесом. Це пов'язано з метрологічним забезпеченням процесів вимірювання цих параметрів та недоліком інформації про взаємозв'язок запропонованих параметрів з експлуатаційними параметрами та за вибором методів обробки поверхонь деталей.

До основних показників, що характеризують фізикохімічний стан поверхневого шару деталей відносять:

$H_{\mu 0}$  – поверхневу мікротвердість;

$U_n, h_n$  – ступінь та глибину наклепу поверхневого шару;

$\sigma'_{ост}, \sigma''_{ост}$  – поверхневі залишкові макронапруги 1-го та 2-го роду;

$h \square 0$  – глибина залягання залишкової напруги першого роду та ін.

На значення цих показників впливають структурно-фазовий (розмір і форма зерен; щільність дислокацій; розмір блоків; концентрація та число фаз та ін.) та хімічний склад матеріалу деталі.

Результати дослідження впливу ПКПС на ЕС деталей машин представлено у багатьох наукових працях. Проблеми зношування та підвищення зносостійкості сполук розглядаються в роботах Алексеєва П. Г., Білого Ст А., Гаркунова Д. Н., Крагельського І. Ст, Міхіна Н. М., Пронікова А. С., Рижова Е.

Ст. , Сулова А. Г. та ін. При дослідженні впливу фізико-механічних та геометричних параметрів якості та фізико-хімічних процесів, що протікають у поверхневому шарі, на її зносостійкість було встановлено, що тертя поверхонь визначається молекулярною складовою, пов'язаною з подоланням опору в плівці, та механічної, пов'язаної з деформуванням та формозміною підплівкового шару. На механічну складову коефіцієнта тертя великий вплив має шорсткість поверхні.

Геометричні параметри якості поверхонь, у тому числі параметри шорсткості та хвилястості, суттєво впливають на різні показники ЕС деталей машин.

### 1. Інтенсивність зношування поверхонь деталей.

Більшість деталей машин виходить з ладу в результаті їх зношування в процесі тертя. У період нормального зношування інтенсивність процесу руйнування поверхневих шарів деталей може бути визначено за залежністю:

$$I_h = \frac{1,2 \pi p^{7/6}}{n \lambda tm^{3/2} H_{\mu 0}^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi Ra Wz Hmax)^{1/3}}{E Sm}}, \quad (1.1)$$

де  $n$  - число циклів навантажень, що призводять до руйнування матеріалу;  $p$  – номінальний тиск на поверхню тертя;  $\lambda$  – коефіцієнт, що враховує вплив на зношування поверхневих залишкових напруг;  $tm$  - відносна опорна довжина профілю шорсткості на рівні середньої лінії профілю;  $H_{\mu 0}$  – поверхнева мікротвердість;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $Ra$  - середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості від середньої лінії в межах базової довжини;  $Wz$  - висота нерівностей профілю хвиль по десяти точках;  $Hmax$  – максимальна висота макровідхилення;  $E$  – модуль Юнга;  $Sm$  – середнє значення кроку нерівностей профілю шорсткості середньої лінії.

### 2. Контактні деформації та контактна жорсткість.

Контактна жорсткість  $j$  визначається як відношення величини проекції сили  $P$ , що прагне здеформувати деталь, до величини  $u$  до нормальних контактних переміщень двох деталей:  $j = P / u_k$ . Величина  $u_k$  при першому



додатку навантаження визначається як сума пластичних та пружних контактних деформацій поверхневих шарів двох деталей:

$$y_k = (y_{nl1} + y_{nl2}) + (y_{yn1} + y_{yn2}). \quad (1.2)$$

При дії нормальної сили  $P$  на плоский стик величина пластичних деформацій становить:

$$y_{nl} = \pi \sqrt[3]{\frac{2\pi P R a W z H_{max}}{A H_{\mu 0}}}, \text{ мкм} \quad (1.3)$$

де  $A$  – геометрична площа контакту.

Пружні деформації пропорційні пластичним

$$y_{nl} = 2\pi \frac{1-\mu^2}{E} H_{\mu 0} S m \frac{y_{nl}}{R a}, \text{ мкм} \quad (1.4)$$

3. Несуча здатність профілю визначається безрозмірним комплексом Крагельського-Комбалова:

$$\Delta = \frac{R m a z}{\rho_m b^{1/v}} \text{ або } \Delta = \left(\frac{100}{t p}\right)^{1/v} \frac{R p}{\rho_m}, \quad (1.5)$$

$b$  і  $v$  – параметри початкової ділянки кривої опорної поверхні;  $\rho_m$  – середній радіус кривизни виступів профілю шорсткості.

Чим менший комплекс  $\Delta$ , тим вище здатність профілю шорсткості поверхні, що несе.

4. Поверхнева контактна статична та динамічна міцність.

При дії статичної  $P_{cm}$  і динамічної  $P_d$  складових навантаження на поверхневий шар деталі контактні руйнування поверхні визначаються величиною контактної деформації, що накопичується, яка може визначатися за залежністю:

$$y_t = \sqrt[3]{\frac{2\pi(P_{cm} + P_d) R a W z H_{max} \left(\frac{t}{t_{HB}}\right)^m}{A H_{\mu 0}}}, \quad (1.6)$$

де  $t$  - час дії сил;  $t_{HB}$  – час випробування на твердість за Брінеллем;  $m$  - показник зростання деформацій при дії динамічного навантаження;  $A$  – геометрична площа контакту поверхонь деталей.

5. Статична та втомна міцність.

Нерівності, що утворюються на поверхні деталей при їх обробці, є концентраторами напруг і є одним з факторів зниження межі витривалості. Коефіцієнт концентрації напруги для поверхонь деталей, одержаних методами механічної обробки, визначається співвідношенням:

$$\alpha_0 = 1 + \frac{200}{tm Sm} \sqrt{2\gamma Rmax(Rmax - Rp)}. \quad (1.7)$$

$\gamma$  – коефіцієнт, що враховує вплив на міцність деталі поверхневих залишкових напруг.

#### 6. Корозійна стійкість.

Комплексний параметр, що характеризує швидкість корозії поверхневого шару нетермообробленої деталі після механообробки, визначається емпіричною залежністю:

$$v_x = v_{x0} \left( 1,1U_n^4 + 4U_n^3 - 4,1U_n^2 \right) \left( 28 \cdot 10^6 \frac{Rmax - Rp}{tm^2 Sm^2} \right)^n, \quad (1.8)$$

де  $v_{x0}$  - швидкість корозії матеріалу деталі до механічної обробки;  $U_n$  – ступінь наклепу поверхневого шару ( $U_n = 1,0 \dots 1,75$ );  $n$  – коефіцієнт, що залежить від умов кородування.

#### 7. Герметичність з'єднань.

Згідно із законом Дарсі про фільтрацію рідин і газів у пористому середовищі величину витoku  $Q$  через поверхні, що сполучаються, можна визначити за формулою:

$$Q = 0,0066 \frac{\pi D \Delta p k}{\mu' l} H \quad (1.9)$$

де  $D$  та  $l$  – розміри з'єднання;  $\Delta p$  – перепад тиску;  $k$  – коефіцієнт проникності;  $\mu'$  – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини чи газу;  $H$  – товщина пористого шару поверхонь, що сполучаються під навантаженням, що залежить від параметрів якості поверхонь, що сполучаються деталей 1 і 2:

$$H = 0,5(Hmax_1 + Hmax_2 + Wz_1 + Wz_2) + Rp_1 + Rp_2 - y_k, \quad (1.10)$$

де  $u_k$  – контактна деформація поверхонь, що сполучаються, визначається за залежністю (1.2).

#### 8. Міцність посадок із натягом.

Під міцністю посадок з натягом  $S$  розуміється здатність передавати деталями, що сполучаються, крутний момент  $M_{кр}$  і осьові навантаження  $P$  без взаємного прослизання деталей. Міцність з'єднань визначається величиною наведеного натягу  $\bar{S}$ , що враховує шорсткість, хвилястість та макровідхилення поверхонь валу 1 і втулки 2:

$$S = S - 0,5(H_{max1} + H_{max2} + W_{z1} + W_{z2}) - Rp_1 - Rp_2. \quad (1.11)$$

Можна навести ще безліч прикладів впливу ПКПС на різні ЕС деталей, такі як аеро- та гідродинамічний опір тіл, обтічність рідиною і газом, теплопровідність з'єднань, електричну провідність та електроконтактний опір, магнітні властивості, відображення електромагнітних хвиль і світла від поверхні, радіаційні властивості та ін. мастильна здатність еластогідродинамічних мастильних матеріалів, різні економічні та технічні характеристики при призначенні технологічних режимів та ін.

#### Висновки по розділу

Викладене дозволяє констатувати, що експлуатаційні властивості деталей машин значною мірою залежать від наступних параметрів якості поверхневого шару:  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rp$ ,  $Sm$ ,  $tp$ ,  $\rho_m$ ,  $Wa$ ,  $W_{max}$ ,  $Smw$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{\mu 0}$ ,  $U_n$ ,  $h_n$ ,  $\sigma_0$ ,  $h_{\sigma 0}$ .

Ці параметри є основними при виборі системи характеристик, що визначаються конструкторсько-технологічної документації.

Знання закономірностей комплексного та роздільного впливу ПКПС деталі на їх ЕС дозволяє оптимізувати техпроцеси виготовлення деталей.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНІЧНЕ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для вирішення завдань, поставлених у 1 розділі, використовувався розроблений комплексний підхід до експериментальних досліджень технологічних систем металообробки для оцінки параметричної надійності технологічних систем з параметрів якості та експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин (рис. 2.1).

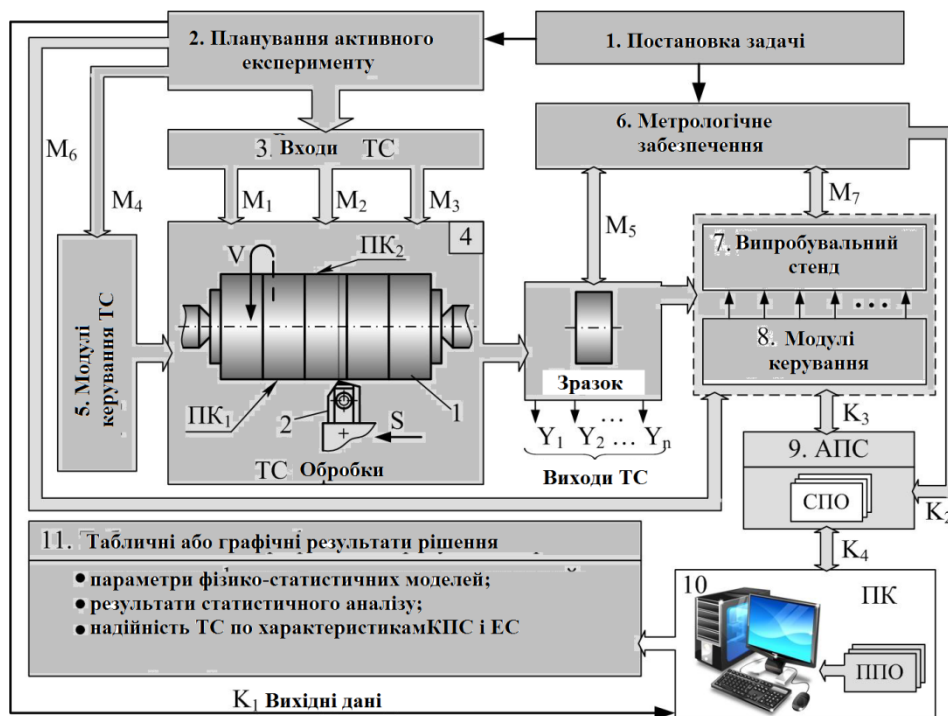


Рис. 2.1. Структурна схема експериментальних досліджень параметрів технологічних систем металообробки для оцінки їхньої параметричної надійності

При плануванні експерименту 2 вибираються входні фактори ТС 3 у вигляді множин  $M_i$ :  $M_1$  – параметри якості поверхні після попередньої обробки ПК<sub>1</sub> або режими попередньої обробки, що задаються з метою дослідження впливу технологічної спадковості на формування параметрів якості поверхні ПК<sub>2</sub> у процесі обробки;  $M_2$  – геометричні чи інші параметри інструменту;  $M_3$  – режими та інші умови обробки ТС (блок 4). Поряд з вибором факторів

регламентуються їх межі варіювання, що визначають досліджувану область факторного простору. Це питання, якщо він не обумовлений у постановці задачі 1, вирішується експериментально або шляхом аналізу апріорної інформації про досліджувану ТС.

До складу структурної схеми входять також випробувальні стенди 7 для дослідження ЕС поверхонь деталей, апаратно-програмні засоби (АПС) 9, комп'ютер 10, а також програмні або ручні модулі управління ТС (блок 5) та випробувальними стендами 8. Управління модулями 5 та 8 здійснюється автоматично або вручну шляхом введення елементів множин  $M_4$  та  $M_6$ , сформованими відповідно до плану експерименту.

У структурній схемі діють такі основні канали передачі:  $K_1$  – вихідні дані активного експерименту в ПК (10);  $K_2$  – результати вимірювання параметрів якості пристроями автономної дії (вимірювальні блоки профілометрів, мікроскопів та ін.);  $K_3$  - вимірювальні сигнали, зняті з датчиків (індуктивних, тензометричних, температурних та ін.), вбудованих у випробувальні стенди;  $K_4$  – обмін інформацією між АПС та ПК.

Виходом ТС (4) є параметри якості обробленої поверхні (ПК<sub>2</sub>)  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , які після вимірювання передаються у 6 у вигляді множини  $M_5 = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ . Аналогічно вимірюються 7 і передаються 6 параметри експлуатаційних властивостей поверхні або з'єднання (множина  $M_7$ ), елементом якою вона є.

Експерименти з дослідження параметричної надійності технологічних систем обробки інструментами із синтетичних надтвердих матеріалів (СНТМ) проводилися на зразках із чавуну СЧ20 (ДСТУ), що широко застосовується для виготовлення базових деталей металорізальних верстатів та технологічного оснащення.

Габаритні розміри зразків із чавуну призматичної форми (рисунок 2.2а) становили  $300 \times 60 \times 30$  мм.

Досліджувалась технологічна система торцевого фрезерування деталей із чавуну інструментами, оснащеними СНТМ як метод, що дозволяє забезпечити

високу продуктивність та якість обробки деталей. У різних роботах розглядаються питання застосування інструменту, оснащеного СНТМ, але немає інформації щодо надійності формування параметрів якості поверхні деталей.

Для чистового фрезерування торцевими фрезами застосовувалися різці-вставки, оснащені композитом 10 (гексаніт-Р). Загальний вигляд фрези ( $\varnothing 110$  мм) представлений рисунку 2.2б.

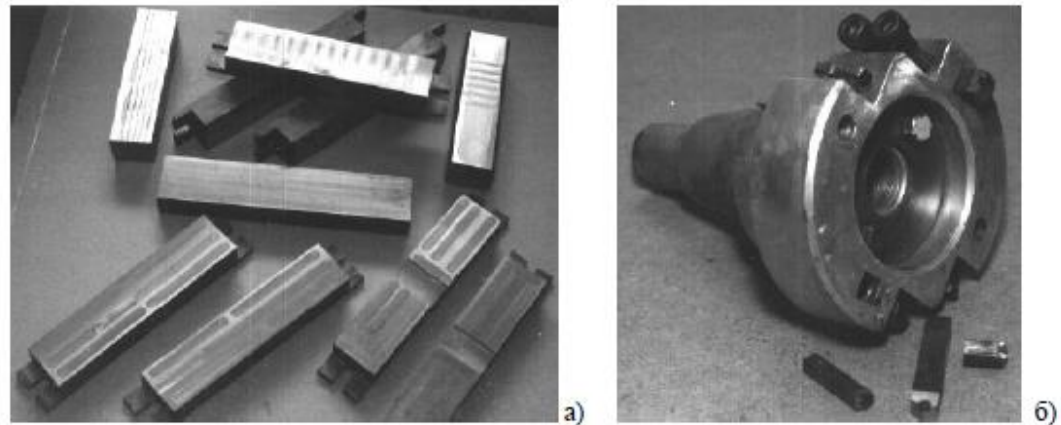


Рис. 2.2. Експериментальні зразки із чавуну СЧ20 (а) торцева фреза для високошвидкісного фрезерування з різцями-вставками, оснащеними композитом 10 (б)

У порівнянні з іншими видами СНТМ композит 10 відрізняється підвищеною зносостійкістю та стабільністю ріжучих властивостей, що пов'язано з особливостями структурного стану композиту 10, в якому нітрид бору представлений сфалеритною ( $BN_{сф}$ ) та вюртцитною ( $BN_{в}$ ) модифікаціями, а графітоподібна фаза вбирається у 1%.

Композит 10 може застосовуватися для переривчастої обробки чавунів з твердістю 160 - 600 НВ, загартованих сталей з твердістю 40 - 60 HRC та ін.

Для фрезерування використовувався однозубий інструмент. Такий вибір обумовлений прагненням забезпечити стійкість процесу обробки, який зі збільшенням кількості ріжучих кромek призводить до зниження вібростійкості процесу фрезерування через виникнення в ТС автоколивань і, як наслідок, підвищення шорсткості і хвилястості оброблюваної поверхні.

Для алмазного вигладжування (АВ) застосовувався інструмент пружної дії з периферійно розташованим індентором із алмазу синтетичного полікристалічного (АСПК, карбонадо) (рис. 2.3).

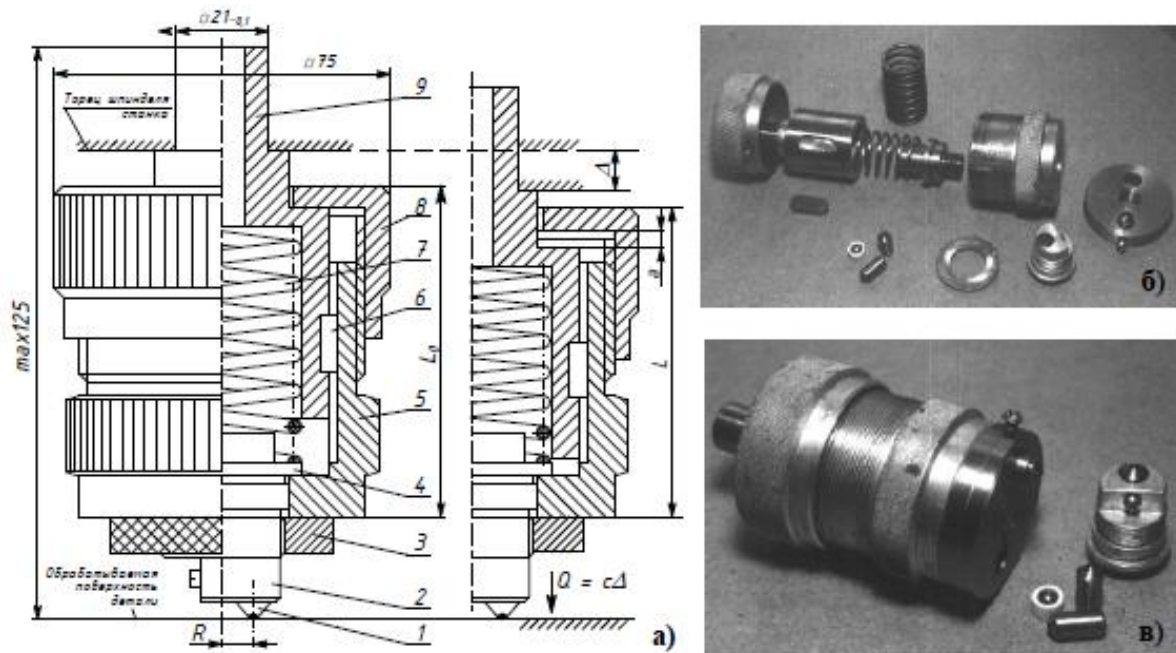


Рис. 2.3. Конструкція інструменту для алмазного вигладжування плоских поверхонь деталей: а – конструкція вигладжувача: 1 – вставка з індентором з АСПК; 2 – тримач; 3 – гайка; 4 – корпус утримувача; 5 – корпус; 6 – шпонка; 7 – пружина; 8 – кришка; 9 – хвостовик; б – вигладжувач у розібраному стані; в – загальний вигляд алмазного вигладжувача з різними власниками та інденторами

В інструменті ППД пружної дії (рис. 2.3а) вставка з індентором 1 кріпиться тримачем 2 в корпусі 4 гайкою 3. Від хвостовика 9 через пружину 7 сила вигладжування  $Q$  передається на корпус тримача 4 початкове положення якої характеризується відстанню  $L_0$ , що регулюється кришкою 8. Крутний момент через шпонку б передається від хвостовика на корпус інструменту 5.

Натяг пружини 7 визначається величиною  $\Delta = (L_0 - L - a)$ , де  $a$  – постійна величина переміщення корпусу власника 4 у напрямку оброблюваної поверхні після контакту з нею індентора. Сила алмазного вигладжування становить  $Q = \Delta c$ , де  $c$  – жорсткість пружини 7.

Тарування пружини здійснюється за допомогою динамометра.

Алмазний індентор може мати як периферійне, так і центральне розташування інструменту. Його конструкція допускає зміну радіусу  $R$  розташування індентора в межах від  $0$  до  $B/2$ , де  $B$  – ширина обробки. У разі експериментів  $R_{max} = 20$  мм.

Поруч із АВ розглядався процес ППД методом накочування кульковим індентором із сталі ШХ15. Конструкція інструменту для АВ (рис. 2.3) дозволяє здійснювати його переналагодження для обробки накочуванням кулькою за рахунок простої заміни алмазних інденторів на кулькові.

У досліджуваній ТС (рисунок 2.4) вхідними керуючими факторами в підсистемі ТС1 є режими фрезерування (глибина  $t$ , подача  $S$ , швидкість  $V$  обробки), інструментальний матеріал та ін., що визначають точність обробки та параметри якості поверхневого шару  $K_1$  (шорсткість, хвилястість, макровідхилення). Разом з режимами вигладжування (подача  $S_{AB}$ , швидкість  $V_{AB}$ , сила вигладжування  $Q_{AB}$ ), видом СОТС та іншими керуючими впливами параметри якості  $K_1$  формують групу керуючих факторів у системі ТС2.

До вихідних факторів  $K_2$  відносяться ПКПС і ПЕМ поверхні, обробленої в підсистемі ТС2.

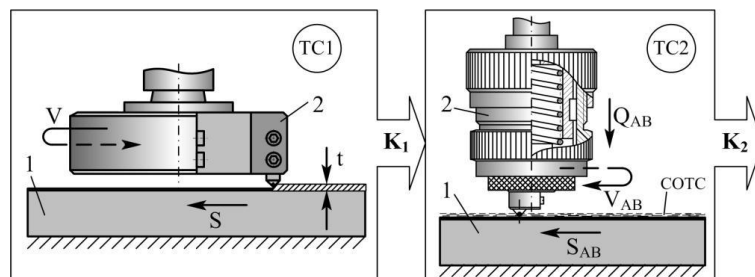


Рис. 2.4. Технологічна система обробки плоских поверхонь деталей із чавуну торцевим фрезеруванням (ТС1) та подальшим алмазним вигладжуванням (або накочуванням кулькою) (ТС2) із застосуванням інструментів, оснащених СНТМ: 1 – оброблювана заготівля; 2 – інструмент

Дослідження проводились на наступних верстатах (рис. 2.5):

- 6А12П як представник універсальних верстатів вертикальної консольно-фрезерної групи;



- 6P13Ф3 як представник верстатів з ЧПУ класу NC та класу PCNC (під керуванням ПК) фрезерної групи (рисунок 2.5 а);
- FQW-400 із системою управління CNC як представника фрезерних верстатів із комп'ютерними системами ЧПУ (рисунок 2.5 б, в).

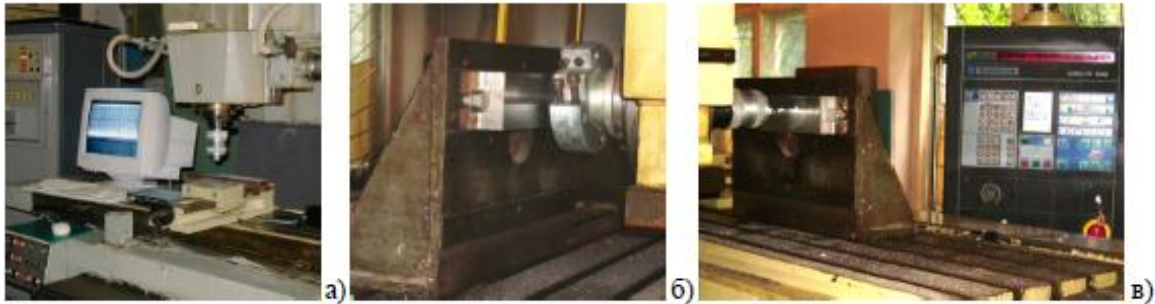


Рис. 2.5. Алмазне вигладжування деталей на верстаті 6P13Ф3(а); торцеве фрезерування (б) та алмазне вигладжування (в) деталей на верстаті FQW-400 із системою ЧПУ CNC-H 646

Одним із завдань досліджень є технологічне забезпечення необхідних ПКПС та ПЕМ, зокрема, зносостійкості циліндричних поверхонь деталей на основі обробки інструментами із СНТМ. Формування параметрів якості, що визначають зносостійкість поверхонь деталей, що труться, здійснювалося в триступінчастій комбінованій ТС обробки, яка включає три основні етапи (рис. 2.6).

1 етап – попередня чистова обробка поверхні, що забезпечує задану точність розмірів деталі та необхідні геометричні параметри якості для ефективного нанесення матеріалів приробіткових плівок. Технологічні операції можуть виконуватись чистовим точінням  $O_{11}$  інструментом зі СНТМ або шліфуванням  $O_{12}$ . Переважно застосування лезових методів обробки, у яких виключається процес шаржування поверхні.

2 етап – нанесення на поверхні деталей матеріалів для одержання м'якої підробітної плівки. Операція виконується двома способами:  $O_{21}$  – фінішною антифрикційною безабразивною обробкою (ФАБО) фрикційним латуванням (мідненням та ін.);  $O_{22}$  – хімічний спосіб, що включає нанесення на поверхню

хімічних розчинів, що викликають осадження на ній плівки м'якої речовини, наприклад, міді.

3 етап – формування мікропрофілю, що виключає процес мікрорізання і забезпечує необхідні ПЕМ, зокрема зносостійкість. Обробка здійснюється методами ППД:  $O_{31}$  – алмазним вигладжуванням;  $O_{32}$  – наковчуванням кульками тощо.

Для досліджень технологічних можливостей ТС використовувалися циліндричні деталі зі сталі 45 з твердістю HRC 48...50, як типового представника середньовуглецевих конструкційних сталей.

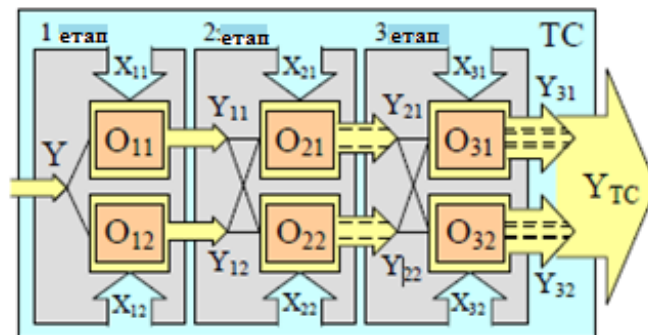


Рис. 2.6. Схема триступеневої комбінованої технологічної системи обробки деталей:  $Y$  – якість поверхневого шару, одержана на попередніх технологічних операціях;  $Y_{11}, \dots, Y_{mn}$  – ПКПС на проміжних етапах технологічного процесу обробки;  $Y_{ТС}$  – ПКПС після обробки;  $X_{mn}$  – фактори обробки технологічної операції;  $O_{mn}$  – вид технологічної операції;  $m$  – етап обробки;  $n$  – метод обробки

При обробці поверхонь зразки у вигляді ступінчастих валиків (рисунок 2.7 а) базувалися в центрах, а у вигляді кілець розмірами  $\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times \varnothing 20$  мм (малюнок 2.7 б) – на оправках 3 або 4 (малюнок 2.7 г) з різною.

На етапі 1 (рисунок 2.6) параметри якості поверхонь деталей формувалися на токарному верстаті чистовим точінням стандартними різцевими вставками 1, ріжуча частина яких оснащена композитом 10. Вставки закріплювалися в державці 2 (рис. 2.7).

АВ та нанесення м'яких приробіткових плівок здійснювалося інструментами пружної дії 5, 6, з інденторами 7 (рис. 2.7 д, е), оснащені алмазами АСПК або латунні стрижні 8 для ФАБО (рис. 2.7 д).

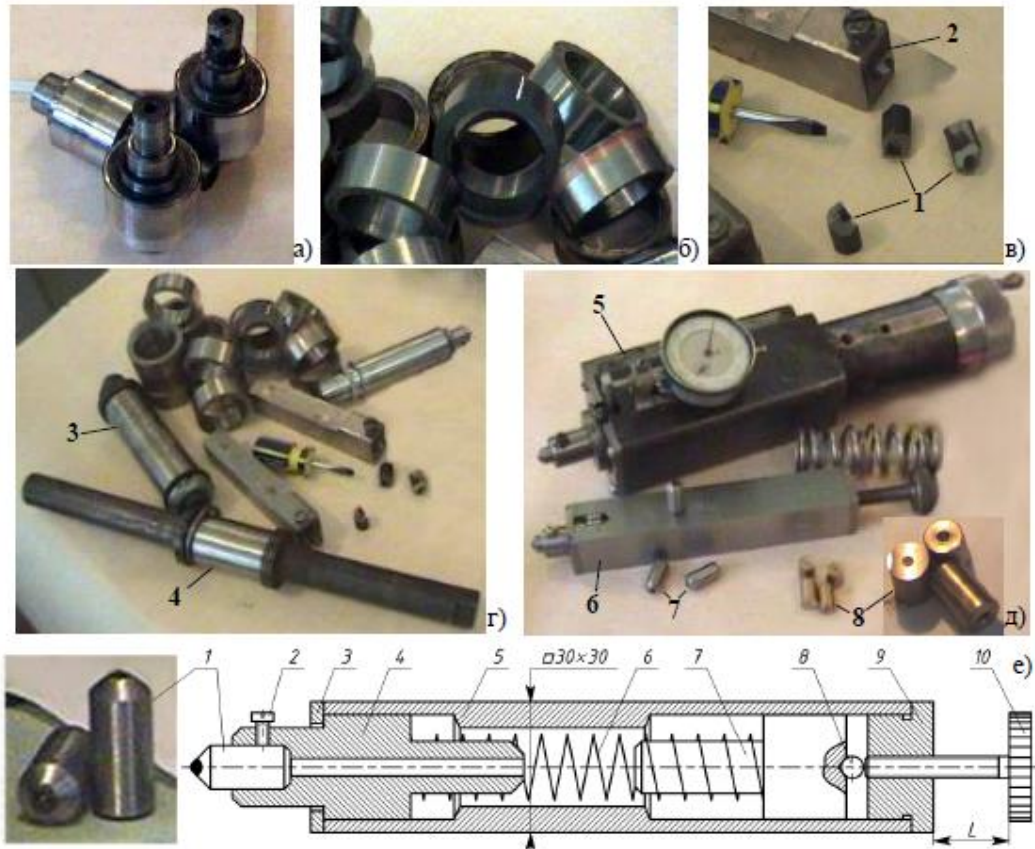


Рис. 2.7. Зразки та оснащення для дослідження ТС обробки циліндричних деталей: а) зразки валів монолітні; б) зразки валів як кілець, встановлюваних на оправки; в) державка для тонкого точіння та різцеві вставки із СНТМ; г) оснащення та інструмент; д) інструмент пружної дії для АВ та ФАБО; е) конструкція інструменту пружної дії: 1 – алмазний індентор; 2 – гвинт; 3 – кришка; 4 – тримач; 5 – корпус; 6 – пружина; 7 – шток; 8 – кулька; 9 – заглушка; 10 – регулювальний гвинт

У процесі ФАБО фрикційним латунуванням поверхні застосовувалися поверхнево-активні речовини (гліцерин). У зоні контакту латунного стрижня з поверхнею обробки утворювався тиск 30 МПа. Подача інструменту з латунним стрижнем становила 0,05 мм/об обробка деталі проводилася зі швидкістю 20

м/хв. Обробка поверхні здійснювалася за три проходи, що забезпечувало формування стійкої плівки.

Загальний вид операції фрикційного латунування показано рисунку 2.8 г.

Хімічне повільність (рисунок 2.8 б) поверхні на 2 етапі комбінованої обробки здійснювалася нанесенням на знежирену поверхню зразка, що обертається зі швидкістю  $V = 20$  м/хв, розчину хлорної міді  $\text{CuCl}_2$  в суміші 70%-вої оцтової кислоти ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 86 г.) з гліцерином ( $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$ , 92 г.). Рівномірна мідна плівка формувалася на поверхні через 7 – 10 хвилин витримки деталі з постійною невеликою швидкістю обертання (рисунок 2.8).

Обробка деталей здійснювалася на токарно-гвинторізному верстаті 16К20 (рис. 2.8 а) та на токарно-фрезерному обробному центрі мод. EX-308 (Фірма TAKISAWA) (рис. 2.8 д).

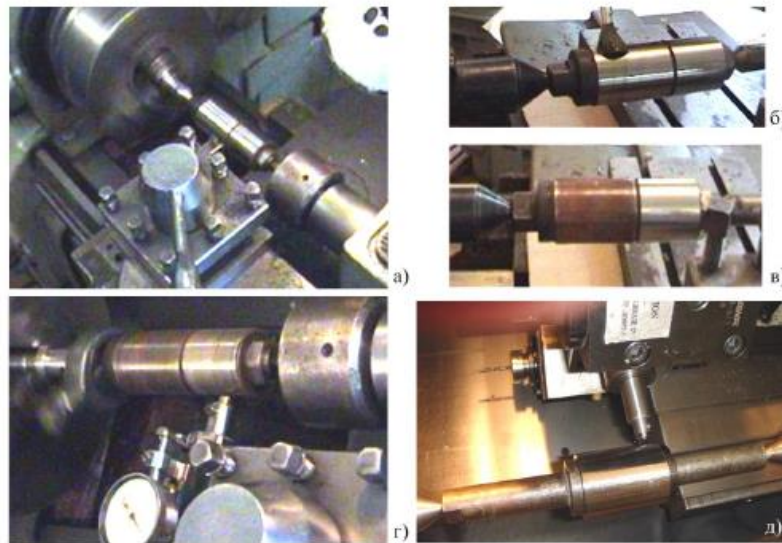


Рис. 2.8. Операції тріступеневої комбінованої ТС обробки деталей: а) чистове точіння композитом 10; б) хімічне повільність; в) поверхнева плівка міді;

г) фрикційне латунування; д) алмазне вигладжування зразків на токарно-фрезерному обробному центрі мод. EX-308

Одним із завдань, поставлених у роботі, є дослідження параметричної надійності процесу формування триботехнічних характеристик поверхонь деталей з'єднань тертя-ковзання.

Розглядалися питання формування триботехнічних характеристик поверхонь у процесі підробітку циліндричних пар тертя ковзання «сталь 45 – бронза ОЦС 5-5-5 або антифрикційний чавун АЧС-1».

На рисунку 2.9 представлено схему моделі з'єднання.

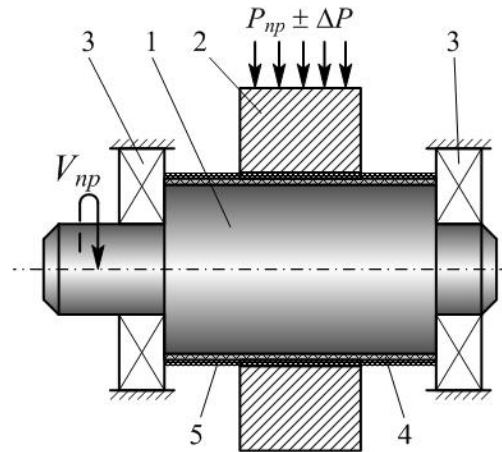


Рис. 2.9. Модель циліндричної пари тертя-ковзання: 1 – модель валу; 2 – модель вкладиша; 3 – підшипники кочення; 4 - приробіткова плівка на поверхні валу; 5 – мастило;  $P$  – погонне динамічне навантаження;  $V_c$  – швидкість відносного ковзання трибоелементів

Моделі валів 1 виготовлялися із сталі 45 (HRC 48...50), функціональні поверхні валів були оброблені комбінованою обробкою (рис. 2.6).

Моделі вкладишів 2 виготовлялися з антифрикційного чавуну АЧС-1 або БрОНЦ бронзи 5-5-5. Функціональні поверхні зразків оброблялися тонким розточуванням.

Дослідження триботехнічних властивостей поверхонь здійснювалося на установці триботехнічних випробувань циліндричних пар тертя-ковзання при динамічних навантаженнях, що є модернізованим варіантом пристрою, що застосовувався в дослідженнях. Схема установки представлена на рисунку 2.10.

Втулка 27, що імітує вкладиш підшипника ковзання, і вал 7 утворюють досліджуване з'єднання. Вал 7 разом з конічними роликівими підшипниками 8 встановлюється в корпусі 3, який кріпиться до плити 1 гвинтами 2.

Після вибору у підшипниках осьового зазору затяжною гайки 27 вал з підшипниками остаточно кріпляться до корпусу 3 кришкою 26. Навантаження на пару тертя

створюється блоком, що включає гвинт 20, зразковий динамометр 10 з тензодатчиками, відкидний важіль і проміжний натискний елемент (не показані), кульки 12, 9 та ролики 46 та 49, що дозволяють здійснювати симетричне радіальне навантаження на об'єкт дослідження. Гвинт 20 загвинчується в гайку 13, запресовану у стійку, встановленій на плиті 1. Гайка 13 для виключення провороту фіксується штифтом у стійці. Консольна балка 30 із тензодатчиками дозволяє виміряти величину моменту тертя.

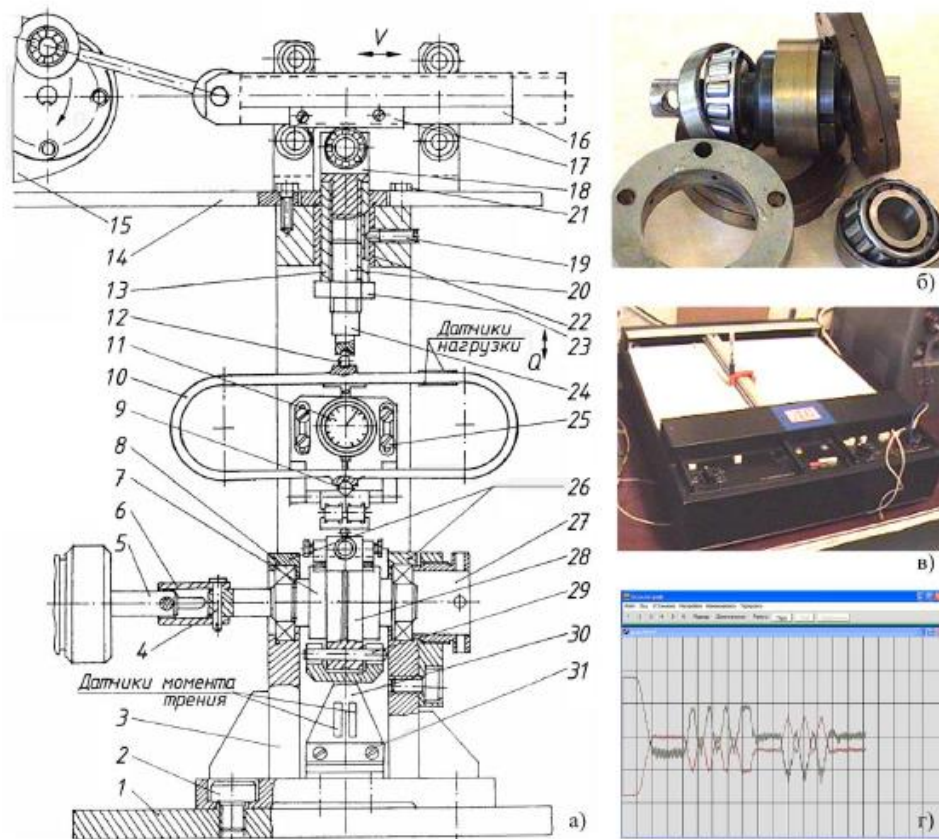


Рис. 2.10. Установки для триботехнічних випробувань: а – схема установки; б – модель вузла тертя; в – двокоординатний самописець ДС; г – вікно результатів вимірювань програми «Осцилограф»

Обертання валу в моделі пари тертя, що випробовується, забезпечується приводом з регульованою швидкістю обертання.

Зміна навантаження щодо номінального навантаження  $P_0$  характеризується амплітудою коливального навантаження  $\Delta P$  та періодом її змін  $T$ . Величина  $\Delta P$  визначається у відносних величинах:  $\Delta P = ((P_{max} - P_{min}) / 2 P_0) \cdot 100 \%$ . Навантаження змінюються згідно із законом:  $P = P_0 (a + b \sin \omega t)$ , де  $a, b$  — коефіцієнти,  $0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1$ .

У модулі створення змінних динамічних навантажень частота зміни навантаження  $\omega$  задається за допомогою редуктора, а програмоносієм амплітуди є кулачок.

У процесі випробувань установка забезпечує вимірювання та реєстрацію навантаження на трибоелементи, моменту тертя, температури у зоні контакту поверхонь, величину контактних переміщень у стику.

Модуль електронного лічильника числа циклів навантаження, керований електроконтактним датчиком знаходиться в модулі створення змінного програмного навантаження 15 (рисунок 2.10 а)

Вимірювання температури у зоні контакту здійснюється електронним термометром ТЕН-5.

Вимірювальний блок реалізований у двох виконаннях. У першому виконанні датчик підключається до тензопосилувач ТА-5 для реєстрації контрольованих процесів на двокоординатному самописці або шлейфовому осцилографі Н008М (рисунок 2.10в).

У другому варіанті застосовується вимірювальна система "Осцилограф" на базі ПК, що підключається до виходу тензометричного підсилувача ТА-5. Робота системи «Осцилограф» забезпечується програмами периферійного інтерфейсу, інтерфейсу користувача та спеціального математичного забезпечення. Система дозволяє вимірювати одразу кілька параметрів (рисунок 2.10 г).

Оцінка величини лінійного зносу здійснювалося на профілактографі та кругломірі при вимірюванні вихідного та зношеного ділянок поверхні валу та вкладиша.

Приробіток з'єднання проходить з використанням мастила (масло «Індустріальне І-30А»). Вона подається до зони тертя по 5 – 10 крапель кожні 20 хвилин.

Питання метрологічного забезпечення параметрів якості поверхонь, що обробляються в процесі досліджень, можна вирішувати різними засобами:

1. Використання вимірювальних засобів (профілографи-профілометри, кругломіри, мікротвердоміри, металографічні мікроскопи та ін.), які фізично працездатні, але морально застаріли та не відповідають сучасним вимогам процесів досліджень з точки зору продуктивності вимірювання, обробки отриманих результатів та оперативної корекції режимів роботи технологічних систем обробки.

2. Використання сучасних вітчизняних чи імпортних комп'ютеризованих систем аналогічного призначення, вільних від недоліків, притаманних засобам п.

1.

3. Використання традиційних вітчизняних вимірювальних засобів, але модернізованих шляхом їхньої комп'ютеризації з відповідним програмним забезпеченням.

Перевагою засобів, зазначених у розділі 1, є їхня максимальна дешевизна, доступність використання, оскільки вони є в лабораторіях та на підприємствах у достатніх кількостях.

Сучасні вимірювальні засоби відрізняються високою якістю, гнучкістю застосування, але висока ціна (особливо імпортних) ускладнить їхнє придбання, особливо для малих виробничих підприємств та лабораторій навчальних закладів та дослідницьких організацій.

Тому великий інтерес представляють модернізовані вимірювальні системи, що мають при помірній вартості переваги.

Актуальність розробки комп'ютеризованої системи вимірювань параметрів шорсткості та хвилястості поверхонь деталей машин обґрунтована таким: 1) комп'ютеризовані профілографи-профілометри, що виготовляються серійно, при



закритому «жорсткому» програмному забезпеченні при обмежених можливостях мають високу вартість; 2) наявні в організаціях парк профілометрів-профілографів старого зразка при хорошому фізичному стані морально застарів, не здатний вирішувати сучасні завдання, що стоять у галузі науки та підготовки інженерних кадрів та потребує модернізації; 3) модернізація систем вимірів на основі застосування віртуальних приладів (ВП) через свою відкритість забезпечує «гнучкість» програмного забезпечення та можливість оперативної корекції структури ВП відповідно до нових вимог.

Реалізація вимірювально-інформаційної системи ПС-1 контролю параметрів шорсткості, хвилястості та відхилень від круглості дозволила підвищити швидкість та інформативність вимірювань геометричних параметрів якості поверхонь деталей.

Основу ПС-1 складають вимірювальні модулі та модуль сполучення з ПК (рисунок 2.11).

Вимірювання параметрів шорсткості та хвилястості здійснюється профілографом-профілометром мод. 170311 ("Калібр"), вимірювання параметрів відхилень від круглості здійснює кругломір мод. 175121 («Калібр»).

Модулем сполучення вимірювальних блоків з ПК є адаптер аналого-цифрового введення-виводу NVL 03 («Сигнал»).

Конструкції електронних блоків профілографа-профілометра та кругломіра дозволяють підключати їх до зовнішніх пристроїв управління – вимірювальну інформацію з датчиків можна передавати на згадку про ПК. Під час роботи ПС-1 використовуються лише вимірювальні блоки профілометра та кругломіра.

Реалізація ПС-1 здійснювалася з перспективами подальшої модифікації та нарощування системи, що визначило її побудову за модульним принципом формування технічних та програмних блоків. Робота її визначається пакетом системних та прикладних програм, що забезпечують послідовний периферійний інтерфейс, інтерфейс користувача, обробку результатів вимірювань, створення баз даних та ін.

Програмне забезпечення (ПЗ) ПС-1 дозволяє виміряти та обчислити наступні геометричні параметри якості поверхонь деталей.

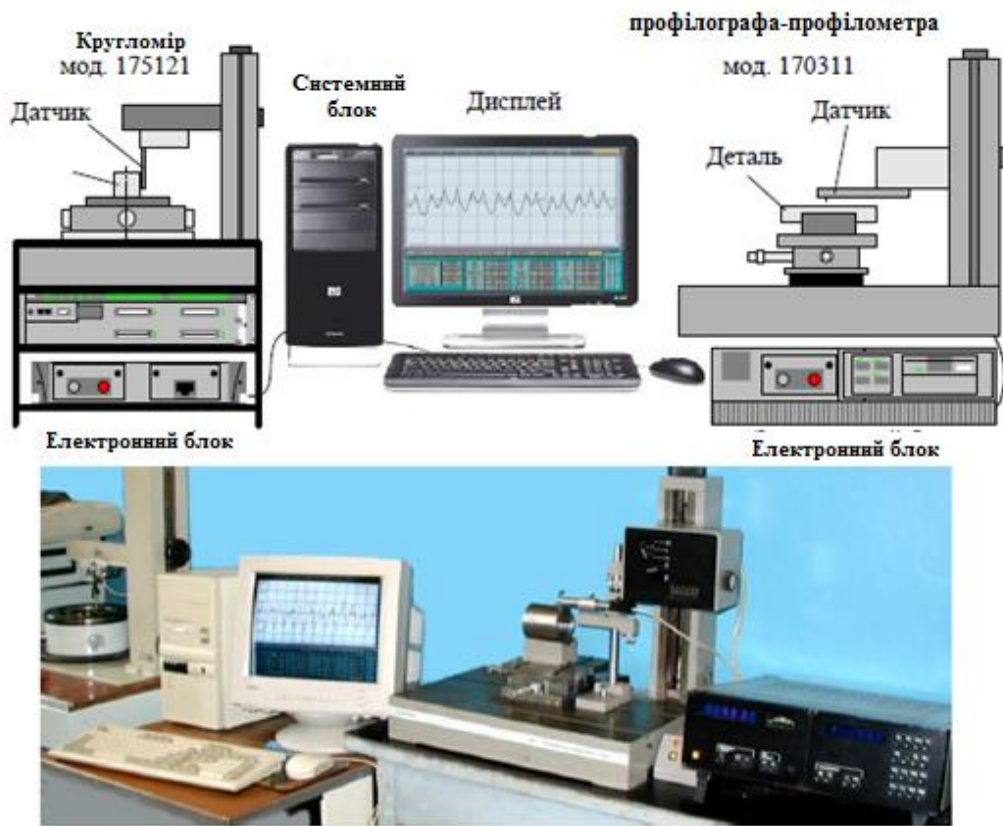


Рис. 2.11. Вимірювально-інформаційна система ПС-1 контролю геометричних параметрів якості поверхонь деталей

#### 1. Параметри шорсткості:

а) за алгоритмом розрахунку, регламентованим ДСТУ: середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості від середньої лінії  $Ra$ ; висота нерівностей профілю шорсткості по десяти точках  $Rz$ ; максимальна висота нерівностей профілю шорсткості  $Rmax$ ; висота найбільшого виступу профілю шорсткості  $Rp$ ; глибина найбільшої западини профілю шорсткості  $Rv$ ; середнє відхилення профілю від середньої лінії  $Rq$ ; середнє значення кроку нерівностей профілю шорсткості по середній лінії  $Sm$ ; середнє значення кроку місцевих виступів профілю шорсткості  $S$ ; відносна опорна довжина  $tr$  профілю шорсткості на рівні  $r$  від лінії виступів; нахил профілю або тангенс кутів нахилу  $tg \alpha$  і у будь-якій точці профілю шорсткості; відносна довжина  $l_0$  профілю

шорсткості; б) з нестандартизованим алгоритмом розрахунку: середній радіус  $\rho$  кривизни вершини місцевого виступу профілю шорсткості; середній радіус  $\rho_m$  кривизни виступів профілю шорсткості; коефіцієнти  $\nu$  та  $b$  апроксимації початкової ділянки відносної кривої опорної поверхні профілю шорсткості; безрозмірний комплекс  $\Delta$  Крагельського-Комбалова;

2. Параметри хвилястості: середнє арифметичне відхилення профілю хвиль від середньої лінії  $Wa$ ; висота нерівностей профілю хвиль по десяти точках  $Wz$ ; максимальна висота профілю хвиль  $Wmax$ ; середній радіус кривизни  $\rho_w$  виступів профілю хвилястості.

3. Параметри відхилень від круглості згідно з ДСТУ: відхилення від круглості  $E_{FK}$ ; середнє арифметичне відхилення від круглості  $E_{FKa}$ ; середнє відхилення від круглості  $E_{FKq}$ ; характеристика овальності  $TFE$

Також будується графік відносної кривої опорної поверхні профілю шорсткості деталі (рисунок 2.12 а).

Інтерфейс ПС-1 містить різні опції, що дозволяють спростити роботу з розрахунку геометричних параметрів якості поверхонь.

Для профілометра основними опціями є (рисунок 2.12а) тарування системи за зразком шорсткості; призначення режимів виміру; збільшення вимірюваного профілю; зміна довжини вимірюваної ділянки поверхні; вибір меж фільтрації при вимірі хвилястості або макровідхилень; розрахунок параметрів профіля профілограми; виділення меж ділянки профілограми для розрахунку параметрів та ін.

Для кругломіра основними опціями є (рис 2.12б) тарування системи за зразком; масштабування вимірюваної круглограми; призначення меж фільтрації круглограми; суміщення осі обертання шпинделя кругломіра з віссю деталі, що вимірюється; розрахунок параметрів відхилень від круглості поверхонь деталей із виведенням результатів на екран та ін.

Вимірювально-інформаційна система ПС-1 є ефективним засобом вимірювання геометричних параметрів поверхонь деталей. Її рекомендується

використовувати у науково-дослідних та навчальних організаціях, у заводських лабораторіях та ін.

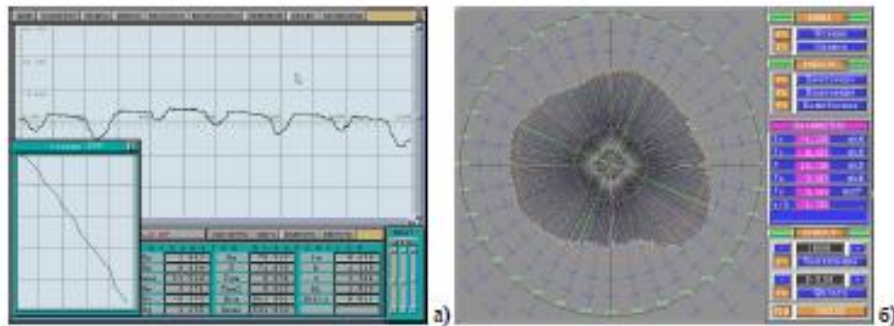


Рис. 2.12. Вікна користувача програмними пакетами: а – профілометр; б - кругломір

Для підвищення надійності ТС необхідний контроль параметрів якості деталей на всіх технологічних операціях – від заготівельних до фінішних.

Для цього необхідно застосування контрольно-вимірювальних приладів безпосередньо на робочих місцях.

Було розроблено мобільну вимірювально-інформаційну систему ПС-2 для контролю параметрів шорсткості та хвилястості поверхонь деталей машин, яка за своїми можливостями аналогічна ПС-1, але відрізняється технічною реалізацією та компактними розмірами.

Як обчислювально-керуючий модуль може застосовуватися ноутбук або мобільна робоча станція. Вимірювальним модулем є блок приводу з датчиком-перетворювачем (наприклад, від профілометра мод. 170622 («Калібр»)), що встановлюється на поверхню, що вимірюється, або на змінних опорах, залежно від контурів і габаритів деталі.

Модулем узгодження керуючого та вимірювального блоків є апаратно-програмний блок оригінальної конструкції, розроблений на базі мікроконтролера AT89C51 (Atmel), що забезпечує ініціалізацію та запуск периферійних об'єктів, введення-виведення інформації, самоконтроль та діагностику та ін. Габарити блоку – 200×150×40 мм (рис. 2.13).

Розроблений апаратно-програмний блок забезпечує живлення змінним струмом індуктивного датчика та приводу руху датчика; формування тактових сигналів; стабілізацію швидкості переміщення датчика; перетворення аналогових сигналів (вимірювання) на цифрові; управління процесами передачі в пам'ять ПК та інших.

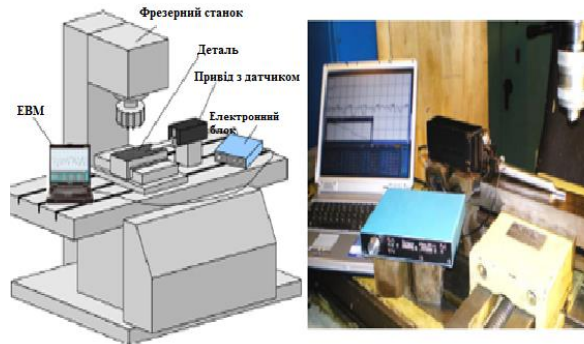


Рис. 2.13. Мобільна вимірювально-інформаційна система ПС-2 контролю параметрів шорсткості та хвилястості поверхонь деталей на робочому місці

Більш широкі можливості має мобільна вимірювально-інформаційна система ПС-3 вимірювання геометричних параметрів якості поверхонь деталей. До складу розробленої системи (рис. 2.14) входять індуктивний датчик з приводом руху (від профілометра мод. 170622 («Калібр») або ін., Блок апаратно-програмного інтерфейсу (АПІ) та ПК).



Рис. 2.14. Інформаційно-вимірювальна система ПС-3 для вимірювання параметрів шорсткості та хвилястості поверхонь ПС-3 може працювати у двох режимах:

1. Передача вимірюваної ІД інформації здійснюється в ПК у процесі вимірювання. Блок АПІ підключається до ПК через порт USB.

2. Вимірювання геометричних параметрів провадиться без підключення до ПК. Датчик із приводом, встановлений на спеціальних опорах у робочій зоні ТС, управляється блоком АПІ. Вимірювана інформація реєструється в його пам'яті виводиться на міні-дисплей на лицьовій панелі. Збережена інформація може потім передаватися для подальшої обробки ПК.

Програма користувача для роботи з ПС-3 забезпечує: 1) запис результатів вимірювань у файл; 2) розрахунок параметрів шорсткості та хвилястості; 3) спектральний аналіз профілограм; 4) побудова гістограми розподілу ординат профілю шорсткості та кореляційної функції з відповідними характеристиками.

У вікні «Розрахунок параметрів» (рисунок 2.15) передбачається вибір ділянки профілограми для розрахунку її параметрів, довжина якого може змінюватись, вибір типу цифрового фільтра та його характеристик за необхідності розрахунку параметрів  $W_i$  хвилястості поверхні. У центральній частині вікна виводяться профілограма обраної ділянки поверхні і графік відносної кривої опорної поверхні профілю шорсткості, за яким за допомогою перехрестя, що переміщується курсором, можна визначити відносну опорну довжину профілю  $t_p$  на будь-якому рівні  $p$  (на рисунку 2.15:  $t_{40} = 0,12$ ). У нижній частині вікна виводяться розрахункові значення параметрів шорсткості.

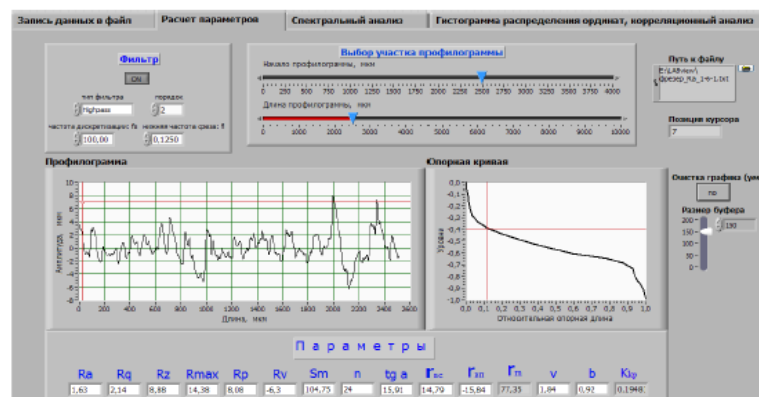


Рис. 2.15. Вікно користувача «Розрахунок параметрів»

На рис. 2.16 показані фрагменти вікон користувача з графіками спектра потужності, амплітудного спектра та гістограми розподілу ординат профілю. При розрахунку гістограм можна варіювати число інтервалів, а протоколи виводяться значення середньої величини, стандартного відхилення, дисперсії, моди, асиметрії, ексцесу і центрального моменту профілю поверхні.

Кореляційна функція розраховується в одній із трьох модифікацій (вибираються користувачем): зміщена, незміщена та без нормалізації.

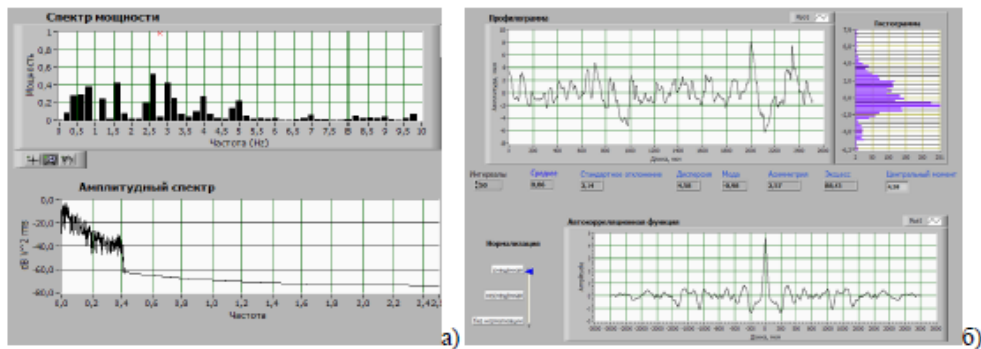


Рис. 2.16. Вікна користувача: а – спектральний аналіз; б – гістограма розподілу ординат, кореляційний аналіз

Для дослідження поверхонь деталей з кількісною оцінкою топографічних параметрів застосовувалася комп'ютеризована система скануючої мікроскопії з урахуванням інвертованого металографічного мікроскопа Leica DM IRM HC (рис. 2.17). Аналіз отриманих зображень здійснює програма ImageScore, що застосовується для статистичної обробки отриманої інформації про стан поверхні та візуалізації отриманих результатів. ImageScore дозволяє оцінювати параметри відбивної здатності поверхонь деталей, яка може бути як експлуатаційною характеристикою, так і комплексною характеристикою, що оцінює стан профілю шорсткість, тобто коли її кількісні показники регламентовані в технічній документації. У найпростішому випадку відбивна здатність характеризується яскравістю.

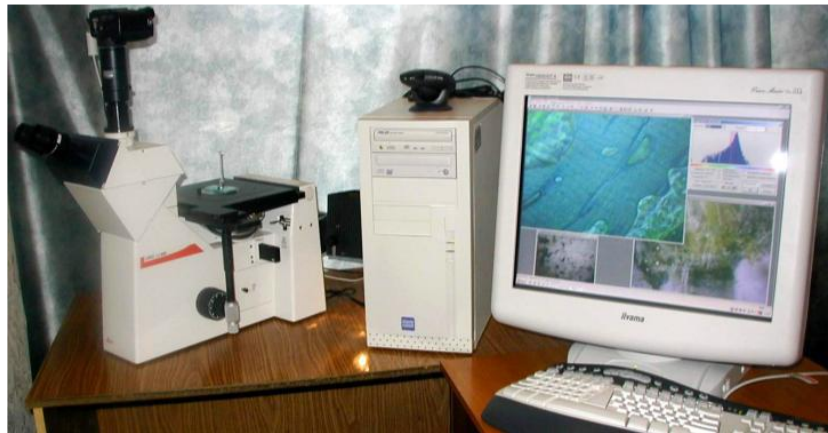


Рис. 2.17. Система скануючої мікроскопії на базі мікроскопа Leica DM IRM  
НС

Приклад такого аналізу за допомогою ImageScore включає мікротопографію вибраної ділянки поверхні, гістограму її яскравості та відповідний профіль яскравості (рисунок 2.18).

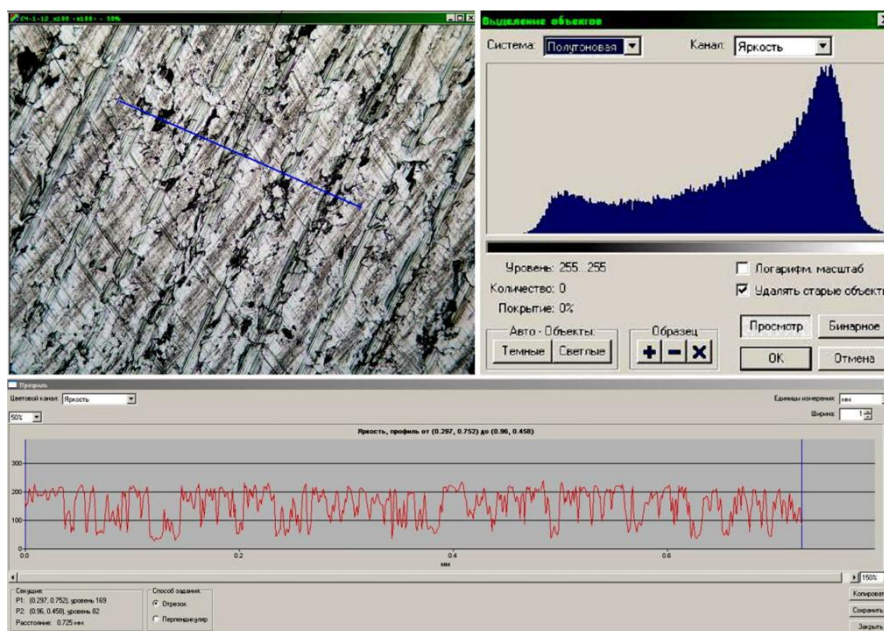


Рис. 2.18. Приклад мікроаналізу поверхні деталі із застосуванням програмного комплексу ImageScore: а – гістограма розподілу яскравості за виділеним ділянці поверхні деталі (синя лінія на мікрофотографії поверхні); б – профіль яскравості по виділеній ділянці поверхні

Комп'ютеризація вітчизняних засобів металографічної мікроскопії поверхонь дозволить за мінімальної собівартості розширити межі досліджень поверхневої структури деталей, оброблених у різних технологічних системах.



Була розроблена система мікроструктурного аналізу поверхонь деталей на базі застосування вітчизняних мікроскопів: металографічних МІМ-10 та МЕТАМ РВ, МБС-2, ПМТ-3М та ін., що дозволяють реєструвати збільшений фрагмент поверхні деталі або зразка, цифрової відео- та фотоапаратури та ПК. Під час створення системи використовувався модульний принцип побудови з відкритим програмним забезпеченням (рис. 2.19).

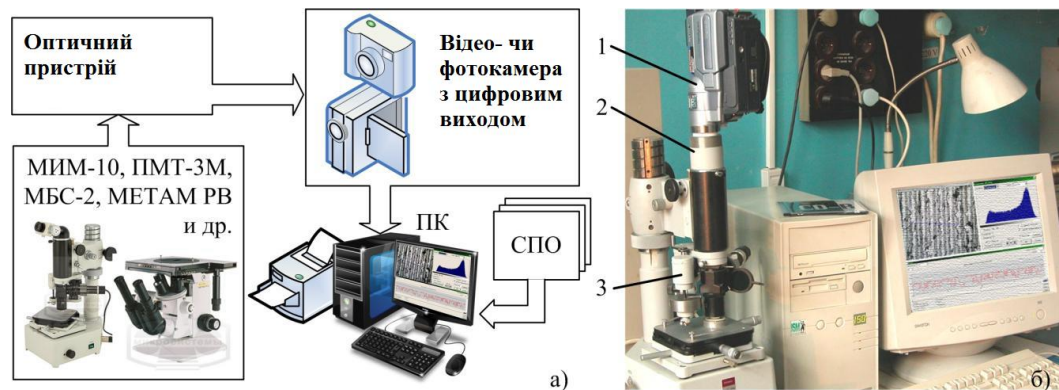


Рис. 2.19. Комп'ютерна система мікроструктурного аналізу поверхонь деталей: а – блок-схема системи; б – загальний вигляд; 1 – цифрова відеокамера; 2 – оптичний узгоджувальний пристрій; 3 – мікротвердомір.

Зображення через оптичний узгоджувальний пристрій передається через цифрову фото- або відеокамеру на ПК для подальшої обробки та аналізу.

Відеозображення дозволяють детально вивчати кінетику досліджуваних процесів на поверхні фізичного (склерометрія та ін) та хімічного (корозія, нанесення плівок та ін) впливів.

Розроблена система мікроструктурного аналізу включає мікротвердомір ПМТ-3М, цифрову відеокамеру, що узгоджує пристрій із ПК.

## Висновки по розділу

Розроблено комплексний підхід до експериментальних досліджень ТС металообробки щодо забезпечення параметрів якості та експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин, що дозволяє уніфікувати процедури отримання та аналізу результатів у лабораторних та виробничих умовах.

Обґрунтовано застосування інструменту, обладнання, досліджуваних технологічних систем та засобів вимірювань.

Розроблено комп'ютерні вимірювальні системи оцінки геометричних параметрів якості поверхонь деталей та системи металографічного аналізу на базі вітчизняної вимірювальної техніки та їх елементів, мікроскопів, цифрової фото- та відеотехніки, що передбачають можливість як стаціонарного застосування, так і безпосередньо у робочій зоні ТС.

### РОЗДІЛ 3

## ПАРАМЕТРИЧНА НАДІЙНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ОБРОБКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ІЗ СТАЛІ 45

Однією з цілей дослідження є створення технології підвищення зносостійкості поверхонь деталей на основі застосування м'яких плівок і обробки ППД АВ. Запропонована у роботі технологія комбінованої антифрикційної обробки поверхонь деталей (ФАБО) є тріступінчастою ТС, яка реалізується за методикою, викладеною у розділі 3.

На 1 етапі ФАБО пропонується застосовувати обробку поверхонь деталей чистовим точінням токарним інструментом, оснащеним композитом 10.

На етапі повинні формуватися необхідні геометричні параметри якості поверхні для ефективного нанесення матеріалів припрацьованих плівок.

Тому необхідно досліджувати технологічні можливості процесу чистового точіння композитом 10 циліндричних поверхонь деталей та визначити його параметричну надійність.

Як керуючі фактори прийняті шорсткість попередньо обробленої поверхні  $Ra_{пр}$ ; глибина  $t$  різання, мм; подача  $S$  інструменту, мм/об; швидкість  $V$  точіння м/хв; геометрія різальної частини токарної інструмента (кути в плані  $\phi$  і  $\phi_1$ , передній кут  $\gamma$ , радіус вершини  $r$ , радіус округлення ріжучої кромки  $r_{кр}$ ).

Область факторного простору та результати моделювання формування параметрів шорсткості поверхонь деталей із сталі 45 (HRC 45...50) чистовим точінням композитом 10.

Експеримент проводився за планом у вигляді дрібної репліки типу 29-5 від ПФЕ типу 25.

На рисунку 3.1 представлені результати ранжирування факторів обробки за ступенем впливу на формування параметрів шорсткості, проведеного аналізом Парето коефіцієнтів  $b'_i$  моделей, розрахованих для кодованих значень (+1, -1) аргументів  $X_j$ .

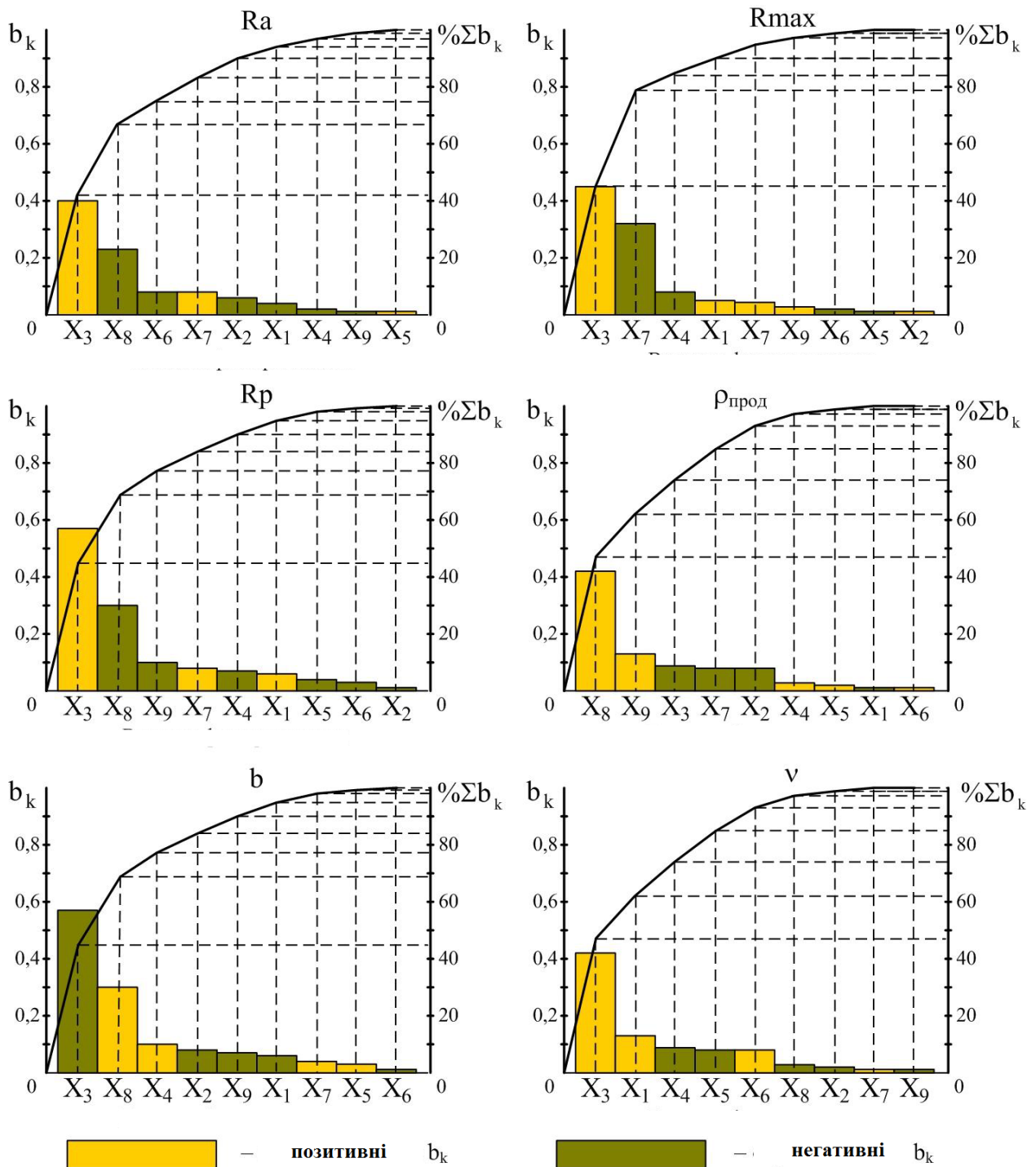


Рис. 3.1. Ранжування факторів обробки за ступенем впливу формування параметрів шорсткості плоских поверхонь деталей чистовим точінням композитом 10:  $X_1 - R_{apr}$ ;  $X_2 - t$ ;  $X_3 - S$ ;  $X_4 - V$ ;  $X_5 - \varphi$ ;  $X_6 - \varphi_1$ ;  $X_7 - \gamma$ ;  $X_8 - r$ ;  $X_9 - \rho_{кр}$

Виявлено фактори із сумарним впливом на результати обробки 75 %: для параметра  $R_a$  – це фактори  $S$ ,  $r$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$ ; для параметра  $R_{max}$  –  $S$ ,  $\gamma$ , для параметра  $R_p$  –  $S$ ,  $r$ ,  $\rho_{кр}$ ; для поздовжнього радіусу мікронерівності –  $r_{пр} - r$ ,  $\rho_{кр}$ ,  $S$ ,  $\gamma$ .

На другому етапі ФАБО необхідно забезпечити умови для формування на поверхні м'якої плівки товщиною 0,2...0,6 мкм.

Процес фрикційного латування забезпечується за умови, що в зоні контакту фрикційного стрижня з оброблюваною поверхнею відбувається мікрорізання матеріалу стрижня, який визначається виразом:

$$R_{max} / \rho \geq 0,5(1 - 2\tau_0 / \sigma_T), \quad (3.1)$$

де  $R_{max}$  – максимальна висота шорсткості;  $\rho$  – середній радіус вершини мікронерівностей;  $\tau_0$  – зсувна міцність адгезійного зв'язку матеріалу фрикційного стрижня;  $\sigma_T$  – межа плинності матеріалу стрижня.

Таким чином, необхідно забезпечити параметри шорсткості  $R_{max}$  і  $\rho$  з інтервалом значень типу, що допускаються.

Визначалася параметрична надійність аналізованої ТС за параметрами шорсткості. На рисунку 3.2 представлені результати розрахунків імовірності виконання завдання для центру ОФП експерименту в ТС чистового точіння композитом 10 поверхонь деталей із сталі 45.

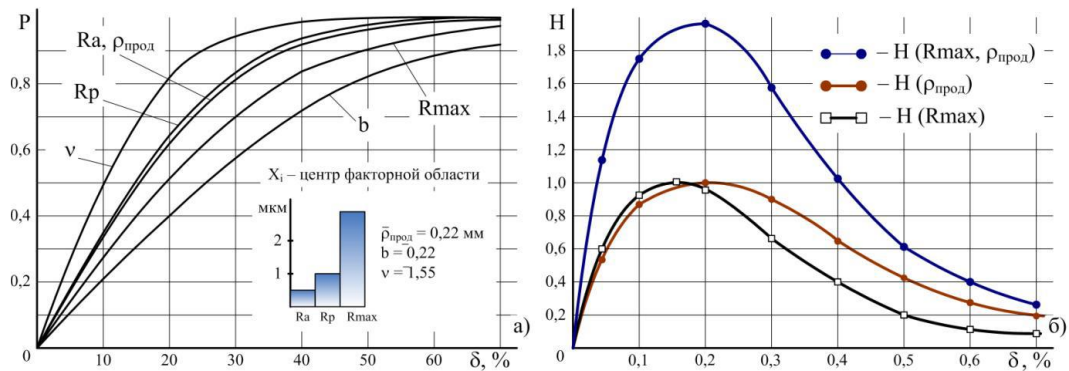


Рис. 3.2. Імовірність технологічного забезпечення параметрів шорсткості чистовим точінням композитом 10 поверхонь деталей зі сталі 45 (а) та зміна інформаційної ентропії залежно від  $\delta$  для параметрів  $R_{max}$  і  $\rho_{prod}$  (б)

За значення  $\delta = 0,3$  ймовірність формування параметрів шорсткості змінюється від 0,57 для  $b$  до 0,95 для  $v$ . Для параметра  $R_{max}$  ( $R_{max} = 2,88$  мкм) вірогідність забезпечення  $P = 0,7$  при  $\delta = 0,3$ , для середнього радіусу вершин виступів мікронерівностей у поздовжньому напрямку  $\rho_{prod}$  ( $\rho_{prod} = 0,22$  мм) –  $P =$

0,81 з ймовірністю  $P = 0,9$  параметр  $R_{max}$  забезпечується при  $\delta = 0,5$ , а параметр  $\rho_{prod}$  при  $\delta = 0,38$ .

Оскільки для забезпечення умови мікрорізання в зоні контакту фрикційного стрижня з поверхнею в процесі ФАБО необхідно забезпечити два параметри ( $R_{max}$  і  $\rho_{prod}$ ), то для ТС можна визначити 4 стани: параметри забезпечуються з ймовірністю  $P$  або не забезпечуються ( $1 - P$ ).

Така невизначеність системи показників  $R_{max}$  та  $\rho_{prod}$  обумовлена залежністю надійності  $P$  від величини  $\delta$ . Вона оцінюється показником інформаційної ентропії, який для систем визначається виразом:

$$H(\overline{Y_1, Y_S}) = - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^S P_{ik} \log_2 P_{ik} = \sum_{k=1}^S H(Y_k). \quad (3.2)$$

де  $P_{ik}$  - ймовірності можливих  $n$  станів параметра  $Y_k$  ( $k = 1, S$ );  $H(Y_k)$  - інформаційна ентропія однопараметричної системи параметра  $Y_k$ .

Аналіз залежностей інформаційної ентропії від параметра зміни параметра для різних систем показує, що максимальна невизначеність виконання умови виникає за  $\delta = 0,15 - 0,2$ .

Отже, для підвищення надійності забезпечення параметрів шорсткості на першому етапі ФАБО необхідно відповідно до умови призначати відхилення параметрів  $R_{max}$  і  $\rho_{prod}$   $\delta > 0,2$ . Збільшення значення  $\delta$  обмежується умовою.

У роботі також досліджувалися технологічні можливості процесу чистового точіння композитом 10 циліндричних поверхонь деталей без урахування геометричних параметрів різальної частини інструменту, тому що на першому етапі ФАБО застосовуються стандартні різці-вставки (головний кут у плані  $\varphi = 60^\circ$ ).

Як керуючі фактори прийняті швидкість різання  $V$ , подача  $S$ , глибина різання  $t$  і жорсткість ТС  $j$ . Бували моделі формування параметрів поздовжньої та поперечної шорсткості.

У таблиці 3.1 наведено значення ОФП експерименту.

Таблиця 3.1 – Область факторного простору експерименту з дослідження процесу точіння композитом 10 циліндричних деталей

| Код фактору | Фактори та рівні їх варіювання |          |       |      |
|-------------|--------------------------------|----------|-------|------|
|             | X1                             | X2       | X3    | X4   |
|             | V, м/хв                        | S, мм/об | t, мм | j    |
| -           | 65                             | 0,05     | 0,1   | 2,5  |
| +           | 200                            | 0,15     | 0,25  | 1,62 |

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти моделей формування параметрів шорсткості поверхні при чистовому точінні композитом 10\*

| Коеф           | параметри шорсткості |              |              |              |              |              |              |
|----------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                | Ra, мкм              | Rp, мкм      | Rmax, мкм    | Rq, мкм      | ρ, мм        | b            | v            |
| b <sub>0</sub> | <u>41.16</u>         | <u>88.7</u>  | <u>180.0</u> | <u>65.2</u>  | <u>0.02</u>  | <u>1.10</u>  | <u>1.58</u>  |
|                | 26.15                | 21.7         | 42.3         | 32.1         | 62.5         | 2.92         | 1.59         |
| b <sub>1</sub> | <u>-0.05</u>         | <u>-0.07</u> | <u>-0.10</u> | <u>-0.12</u> | <u>0.16</u>  | <u>-0.01</u> | <u>-0.06</u> |
|                | -0.45                | -0.24        | -0.25        | -0.44        | -0.83        | -0.03        | 0.01         |
| b <sub>2</sub> | <u>0.65</u>          | <u>0.51</u>  | <u>0.45</u>  | <u>0.65</u>  | <u>-0.08</u> | <u>0.06</u>  | <u>-0.09</u> |
|                | 0.73                 | 0.62         | 0.62         | 0.75         | 1.48         | 0.23         | 0.03         |
| b <sub>3</sub> | <u>0.28</u>          | <u>0.24</u>  | <u>0.26</u>  | <u>0.25</u>  | <u>0.11</u>  | <u>0.08</u>  | <u>0.02</u>  |
|                | 0.57                 | 0.53         | 0.43         | 0.56         | -0.85        | 0.35         | -0.06        |
| b <sub>4</sub> | <u>-0.18</u>         | <u>-0.19</u> | <u>-0.20</u> | <u>-0.17</u> | <u>-0.17</u> | <u>0.05</u>  | <u>0.02</u>  |
|                | -0.90                | -0.10        | -0.18        | -0.12        | -0.15        | 0.04         | 0.02         |

\* – у чисельнику поперечна шорсткість; у знаменнику поздовжня шорсткість

На рис. 3.3 представлені результати розрахунків ймовірності виконання завдання для центру ОФП досліджень процесів формування поздовжньої і поперечної шорсткості в ТС точіння композитом 10 циліндричних деталей Також на малюнку 3.3 показані діапазони значень деяких формованих чистовим точінням параметрів шорсткості в ОФП, що розглядається.

Ймовірність технологічного забезпечення параметрів шорсткості в поперечному напрямку А вище, ніж ймовірність забезпечення таких параметрів у поздовжньому напрямку.

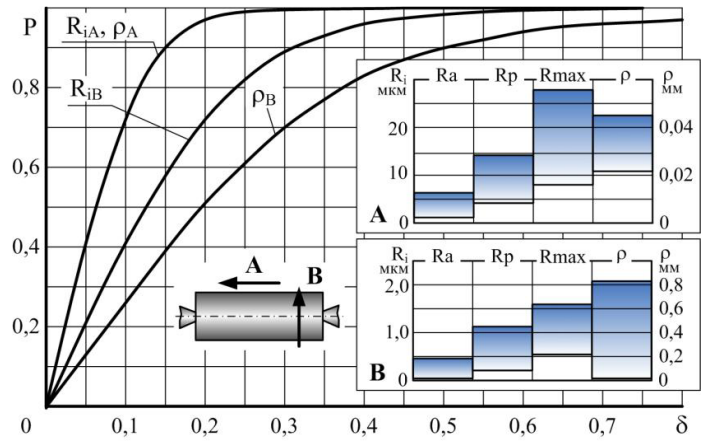


Рис. 3.3. Імовірність технологічного забезпечення параметрів шорсткості поверхонь деталей із сталі 45 у поперечному (А) та поздовжньому (В) напрямках при чистовому точінні композитом 10

Оцінювалося вплив керуючих чинників досліджуваної технологічної системи формування параметрів шорсткості, результати якого представлені малюнку 3.4.

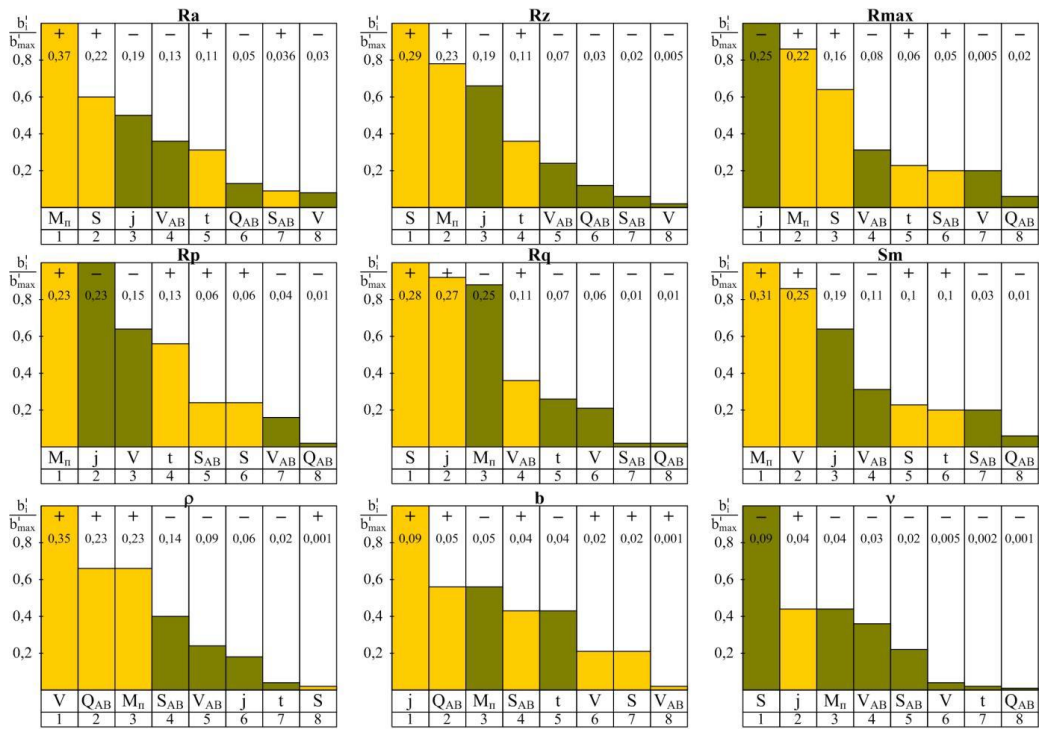


Рис. 3.4. Діаграми стратифікації факторів за параметрами шорсткості оброблюваних поверхонь



Аналіз діаграм показує, що більший вплив на формування параметрів шорсткості надають фактори 1-го та 2-го етапи ТС ФАБО, тобто проявляється механізм технологічного наслідування.

Це факт не є ознакою неефективності АВ в рамках ФАБО, так як фактори операцій точіння композитом 10 та нанесення МПП стратифікуються тільки за умови наступного АВ, що забезпечує високу несучу здатність та фізико-механічні параметри поверхневого шару (напружено-деформований стан).

Вимірювання відхилень від круглості поверхонь деталей, оброблених у ТС КАФО, проводилися за результатами експериментів, що проводяться відповідно до матриці планування (додаток 9) після нанесення МПП та після алмазного вигладжування.

Для кожного з етапів, що розглядаються, будувалися моделі формування параметрів відхилень від круглості (ДСТУ):

- Максимальна величина відхилення від круглості  $E_{FK}$  (F);
- Середнє арифметичне відхилення від круглості  $E_{FKa}$  (Fa);
- Середнє квадратичне відхилення від круглості  $E_{FKq}$  (Fq);
- Параметр, що характеризує овальність TFE (a/b).

На рисунку 3.5 представлені круглограми поверхонь деталей, оброблених різних стадіях ФАБО.

Відхилення від круглості поверхонь деталей, оброблених точінням композитом 10 з наступним нанесенням МПП, оцінюються у вигляді «голчастого» характеру, нерегулярного характеру у вигляді огранювання, у вигляді овальності.

Круглограми поверхонь деталей, оброблених наступним АВ, показують, що змінюються числові значення параметрів відхилень від круглості, зникла «голчаста» структура рисунку 3.5 б, але загалом збереглися характерні візуальні ознаки поверхні, що передаються попередніх етапів обробки відповідно до теорії технологічної спадковості.

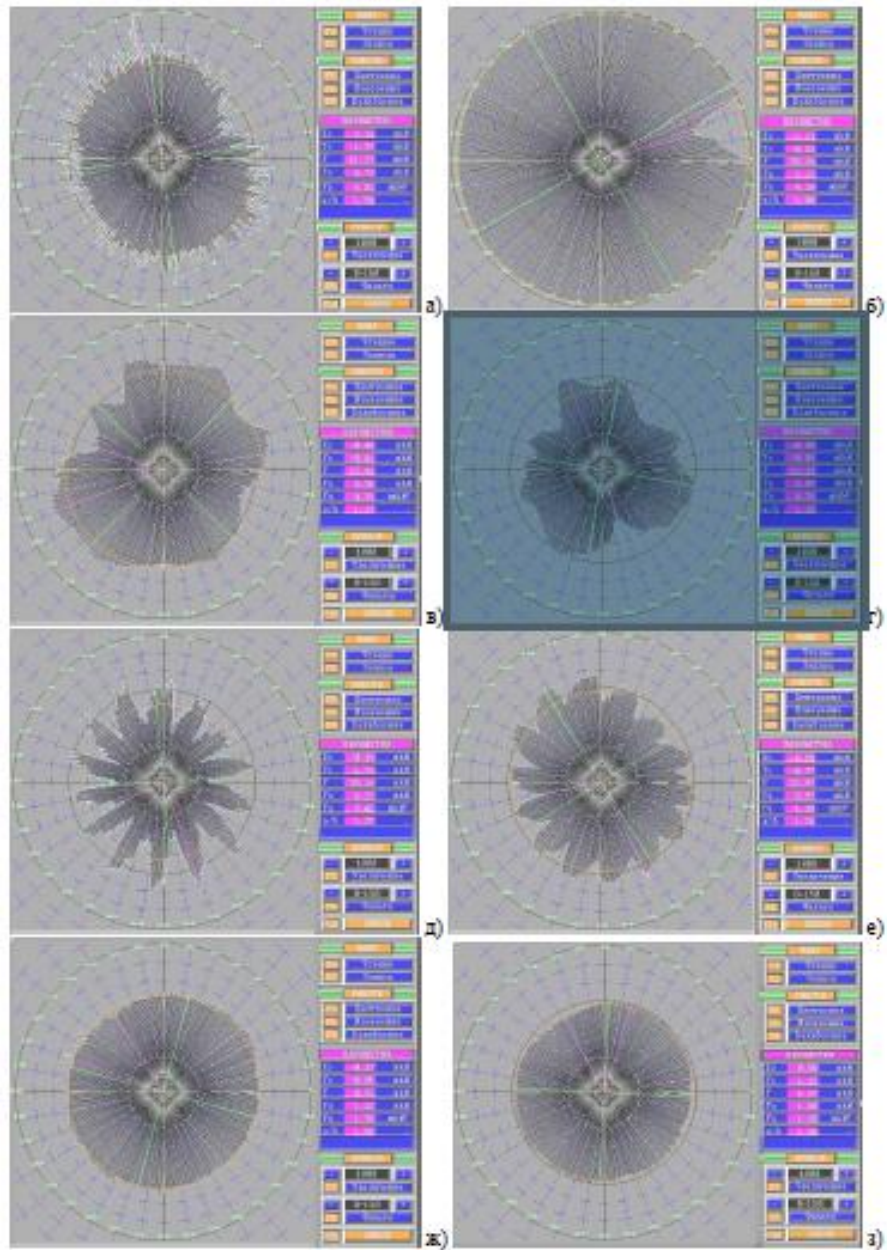


Рис. 3.5. Круглограми поверхонь деталей, оброблених чистовим точінням композитом 10 з нанесенням МПП (а, в, д, ж) та наступним АВ (б, г, е, з)

Побудова моделей формування параметрів відхилень від круглості здійснювалося з урахуванням керуючих факторів чистового точіння композитом 10 та видів нанесення МПП – швидкості різання  $V$ , подачі  $S$ , глибини різання  $t$ , жорсткості  $j$  технологічної системи, способу забезпечення МПП Мп.

## **Висновки по розділу**

Аналіз мікрофотографій поверхонь зразків з чавуну, оброблених алмазним вигладжуванням, показав, що на збільшення їх суцільності надають зниження значень параметрів шорсткості поверхні, отриманих на попередніх етапах обробки та збільшення сили алмазного вигладжування.

## ВИСНОВКИ

На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки.

Встановлено, що між параметрами шорсткості мають місце тісні кореляційні зв'язки для всіх досліджуваних ТС. При збільшенні значення коефіцієнта кореляції  $r$  тіснота зв'язків знижується, причому для алмазного вигладжування це зниження більш інтенсивне. Так, при  $r = 0,9$  для ТС торцевого фрезерування композитом 10 у графі кореляційних зв'язків параметрів шорсткості є одна ізольована вершина ( $b$ ), а для ТС торцевого фрезерування композитом 10 з наступним АВ – п'ять вершин ( $b, v, \rho, \Delta, \Delta H$ ).

Аналіз мікрофотографій поверхонь зразків з чавуну, оброблених алмазним вигладжуванням, показав, що на збільшення їх суцільності надають зниження значень параметрів шорсткості поверхні, отриманих на попередніх етапах обробки, та збільшення сили алмазного вигладжування.

Встановлено, що надійність ТС забезпечення різних параметрів шорсткості поверхонь змінюється в широких межах. Так, для висотних параметрів у діапазоні відхилень  $\delta = 0,2$  ймовірність їхнього забезпечення змінюється в межах: а) для торцевого фрезерування композитом 10 від 0,45  $R_p$  до 0,88  $R_z$ ; б) для торцевого фрезерування композитом 10 з наступним АВ від 0,53  $R_p$  до 0,72  $R_a$ ; в) для точення композитом 10 циліндричних поверхонь від 0,52 для  $R_{max}$  до 0,65 для  $R_p$ ; г) для АВ після точення композитом 10 та нанесення м'яких приробіткових плівок від 0,83 для  $R_a$  та  $R_p$  до 0,95 для  $R_z$  та  $R_{max}$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кіндрачук М. В. Роль локалізації напружень і деформацій в перехідній зоні «матриця – наповнювач» в кінетиці руйнування композиційних покриттів під час тертя / М. В. Кіндрачук, М. В. Лучка, В. Я. Лобурак, І. А. Гуменюк // Проблеми тертя та зношування. 2014. № 2 (63). С. 18–29.
2. Кіндрачук М.В. Механізм припрацювання в гетерогенних евтектичних системах / М. В. Кіндрачук, І. А. Гуменюк, О. О. Мікосянчик та ін. // Проблеми тертя та зношування. 2015. № 1 (66). С. 94–101.
3. Триботехнічні характеристики термооброблених композиційних електролітичних покриттів з наповнювачами евтектичного сплаву / А. О. Корнієнко, І. А. Гуменюк, С. В. Федорчук, Ю. В. Пищенко. // Проблеми тертя та зношування. 2017. № 4 (77). С. 63–68.
4. Основи наукових досліджень : Навчальний посібник / В. С. Марцин, Н. Г. Міценко, О. А. Даниленко та ін. Л.: Ромус-Поліграф, 2002. 128 с.
5. Конверський А. Є. Основи методології та організації наукових досліджень. Київ : Центр учбової літератури, 2010. 352 с
6. Анохин А.А. Некоторые прогрессивные технологии восстановления качества поверхности деталей. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков. 2003. № 5. С. 10-16.
7. Лыгденов Б.Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химикотермоциклической обработкой : автореф. дисс. на соискание степени канд. техн. наук : спец. 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов» / Б.Д. Лыгденов. –Новокузнецк, 2004. 27 с.
8. Бараз В.Р. Влияние деформации трением на структуру и свойства метастабильной аустенитной хромоникелевой стали. Деформация и разрушение материалов. 2011. № 12. С. 15-18.

9. Коршунов Л.Г. Влияние остаточного аустенита на абразивную износостойкость высокоуглеродистых сталей. Матер-лы V Всесоюз. совещания «Структура и свойства немагнитных сталей». Свердловск. 1994. С. 34.

10. Малинов Л. С. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость цементированных сталей с повышенным содержанием углерода после термообработки. *Вісник ПДТУ*. 2000. № 9. С. 92-94

11. Брыков М.Н. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: Научное издание. Херсон : Гринь, 2014. 364 с.

12. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология. Москва : МАДИ (ГТУ), 2003. 248 с.

13. Коротков В.А. Износостойкость материалов с плазменной закалкой. *Трение и износ*. 2011. № 1, Т.32. С.23-29.

14. Руденко С.П. Микроструктура упрочненных слоев высоконапряженных зубчатых колес из хромоникелевых сталей. *Весті національної академії наук Беларусі*. 205 2011. № 1. С. 11-17.

15. Кіндрачук М. В. Характер зниження ефективної межі текучості композиційних покриттів, навантажених силами тертя. Тези доповідей Восьмої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико – матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів, 23–24 квітня 2015р., Київ, Україна. – Київ : НАУ. С. 90.