

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЕМЕГЕН ВОЛОДИМИР ОЛЕГОВИЧ


УДК 621.01+621.9.015+621.787.4+621.715.2

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПРИ ФОРМУВАННІ
ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ НА ПЛОСКИХ
ПОВЕРХНЯХ

131 – Прикладна механіка
13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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


В.О. Семенен

Науковий керівник Дзюра Володимир Олексійович
доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2026

АНОТАЦІЯ

Семеген В.О. Забезпечення параметрів якості при формуванні частково регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя МОН України, м. Тернопіль, 2026 р.

У дисертаційній роботі вирішено завдання забезпечення заданих параметрів якості плоских поверхонь пари тертя (параметрів шорсткості, мікротвердості, маслоємності) шляхом визначення оптимальних геометричних параметрів частково регулярного мікрорельєфу та режимів його формування.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та поставлено задачі дослідження. Описано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача у проведених дослідженнях. Також наведено інформацію щодо апробації результатів дослідження, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Для реалізації мети дисертаційного дослідження у роботі поставлені та вирішені наступні задачі. На основі аналізу причин утворення експлуатаційних дефектів у вигляді задирів спричинених захопленням металу контактуючих поверхонь пари тертя запропонувати параметри поверхневого шару, що запобігають утворенню вказаного дефекту. Отримати аналітичні залежності для визначення відносної площі мікрорельєфу – одного з основних геометричних параметрів мікрорельєфу, що характеризує експлуатаційні властивості поверхонь з регулярними мікрорельєфами. Для реалізації мети необхідно встановити вплив геометричних параметрів мікрорельєфу (типу мікрорельєфу) та режимів його формування (швидкості подачі) на геометричні та фізико-механічні параметри якості поверхні, а також на експлуатаційні її параметри. Із геометричних параметрів якості дослідити висотні параметри шорсткості

поверхні – R_a , R_z , R_{ak} , $R_{mc(25\%)}$, а з фізико-механічних параметрів якості – мікротвердість поверхні в околі канавки, з експлуатаційних параметрів дослідити маслоємність поверхні з регулярним мікрорельєфом.

Для проведення досліджень було проведено дві серії дослідів за методикою ANOVA, яка дозволяє встановити не лише відсотковий вплив кожного із залежних параметрів на досліджуваний параметр, але і їх взаємний вплив, який іноді виявляється досить суттєвим.

Об'єктом дослідження є процес формування канавок частково регулярного мікрорельєфу на плоских поверхнях пар тертя.

Предметом дослідження є взаємозв'язки між геометричними параметрами частково регулярного мікрорельєфу, режимами його формування та параметрами якості поверхні – мікротвердістю, параметрами шорсткості та маслоємністю.

Основна гіпотеза роботи полягає в тому, що для забезпечення заданих експлуатаційних параметрів робочих поверхонь пар тертя необхідно забезпечити оптимальні геометричні параметри поверхні, зокрема створити частково регулярний мікрорельєф, із заданими геометричними параметрами, які забезпечать необхідну мікротвердість поверхні та параметри шорсткості, а також визначити оптимальні режими при яких вони будуть отримані.

Наукова цінність полягає у визначенні впливу геометричних параметрів канавок частково регулярного мікрорельєфу, їх взаємного розміщення, а також швидкості подачі деформувального елемента на відносну площу мікрорельєфу.

В першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз причин зміни експлуатаційних властивостей об'єктів дослідження, зокрема встановлено причини виникнення експлуатаційних дефектів в парах тертя автомобільних вузлів – безступінчастих варіаторних коробках передач та циліндро-поршневого механізму двигуна внутрішнього згорання. Встановлено, що природа та причини виникнення цих дефектів є однаковою – високі питомі тиски на поверхню пари тертя, зростання робочих температур, відсутність мастила на робочих поверхнях і як результат – схоплювання поверхонь пари тертя. Як робочу гіпотезу дисертаційного дослідження запропоновано для запобігання утворенню

схоплювання II роду на робочих поверхнях важко навантажених пар тертя створювати регулярні мікрорельєфи. Для цього проаналізовані основні технологічні способи та методи забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин. Також проведено аналіз останніх досліджень та публікацій в напрямі забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин технологічними методами. Проведений аналіз дозволив сформулювати основні задачі дисертаційного дослідження.

В другому розділі роботи описано алгоритм проведення дисертаційного дослідження. Проведено теоретичне обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів, сформованих на плоских поверхнях, зокрема отримано аналітичну залежність для визначення шляху, що пройде деформувальний елемент за чверть оберту шпинделя при заданих режимах формування мікрорельєфу. Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі поверхні з регулярним мікрорельєфом для рельєфу з паралельними канавками, сформованого на плоских поверхнях. Встановлено умови формування мікрорельєфу в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу та технологічних режимів його формування. Побудовано графіки залежності відносної площі віброобробчування F_e від повздовжньої подачі інструменту, S_{nz} та від частоти $n_{\text{об.х.}}$ осциляцій обкатників, а також графіки відносної площі віброобробчування F_e від кроку канавки t_k . Розглянуто схеми формування частково регулярних мікрорельєфів з канавками, що не перетинаються (I вид), перетинаються (III вид). Побудовані графічні залежності для визначення відносної площі регулярних мікрорельєфів в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу, швидкості подачі інструменту та кількості подвійних ходів, як найбільш впливових параметрів на відносну площу мікрорельєфу.

В третьому розділі проведено експериментальні дослідження з визначення впливу типу мікрорельєфу та режимів формування на геометричні параметри та експлуатаційні властивості поверхонь. Для цього було змодельовано в середовищі MathCAD та виготовлено комплект із 31 дослідного зразка, на поверхні яких сформовано регулярний мікрорельєф різних типів (I, II, III) при різних швидкостях подачі (500, 1000, 1500 мм/хв). При проведенні досліджень

використовували спеціально спроектований та виготовлений інструмент та оброблюючий центр з ЧПК HAAS TM 1. У якості залежних змінних було вибрано стандартизовані параметри профілю поверхні: R_{zx} , R_{ak2} та $R_{mc(25\%)}$. За результатами регресійного аналізу отримано регресійні залежності, що описують вплив досліджуваних параметрів. Експериментальні дослідження проведено за методикою ANOVA, яка дозволяє визначити не лише числовий вплив кожного із параметрів на досліджувані параметри але і оцінити їх взаємодії.

У четвертому розділі роботи проведено експериментальні дослідження мікротвердості та мікроструктури поверхонь з частково регулярними рельєфами. Метою експериментальних досліджень було визначення впливу типу мікрорельєфу та швидкості подачі на мікроструктуру поверхневого шару та мікротвердість в околі канавки. Для проведення досліджень було виготовлено комплект дослідних зразків на поверхні яких сформовано регулярний мікрорельєф різних типів (I, II, III) при різних швидкостях подачі (500, 1000, 1500 мм/хв). Мікротвердість досліджувалась як на гребнях біля напливів металу так і на дні канавок мікрорельєфу. Експериментальні дослідження також проведено за методикою ANOVA. Отримані регресійні залежності впливу типу мікрорельєфу та швидкості подачі на мікротвердість. Побудовані графіки взаємодій досліджуваних параметрів, а також встановлено розподіл мікротвердості в околі канавки мікрорельєфу. Результати досліджень показують, що мікротвердість в околі лунки розподіляється нерівномірно, а найкращий результат (з точки зору рівномірності розподілу мікротвердості) забезпечує II тип мікрорельєфу.

Ключові слова: регулярний мікрорельєф; зношування; режими формування; геометричні параметри; параметри якості; експлуатаційні параметри; оцінювання; інструмент; швидкість деформування; напружено-деформований стан; механічні властивості; технологія; експлуатаційні властивості; змащування; пластична деформація.

ABSTRACT

Semehen V.O. Ensuring quality parameters when forming partially regular microreliefs on flat surfaces. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 Mechanical Engineering, specialty 131 Applied Mechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil, 2026.

The dissertation addresses the task of ensuring the required parameters of surface quality in friction pairs (roughness, microhardness, and oil-retaining capacity) by determining the optimal geometric parameters of partially regular microreliefs and the technological regimes of their formation. The introduction substantiates the relevance of the research, formulates its purpose, and outlines its objectives. The section presents the scientific novelty, practical significance of the obtained results, and the personal contribution of the author. Information on the approbation of the results, the structure, and the scope of the dissertation is also provided. To achieve the research objective, the following tasks were set and solved. Based on the analysis of the causes of operational defects such as scuffing resulting from metal adhesion of contacting surfaces in friction pairs, parameters of the surface layer preventing such defects were proposed. Analytical relationships were derived to determine the relative area of the microrelief – one of its main geometrical parameters that characterizes the tribological performance of surfaces with regular microreliefs. The influence of microrelief geometry (microrelief type) and its formation regimes (feed rate) on surface quality parameters (geometric and physico-mechanical) and operational characteristics was established. Among geometrical quality parameters, the height roughness indices R_a , R_z , R_{ak} , $R_{mc(25\%)}$ were studied; among physico-mechanical quality parameters – surface microhardness near the groove; and among operational parameters – the oil-retaining capacity of the surface with regular microrelief.

Two experimental series were conducted using the ANOVA methodology, which makes it possible to determine not only the percentage effect of each parameter but also their interactions, which may prove significant.

Object of research: the process of groove formation of partially regular microreliefs on flat surfaces of friction pairs.

Subject of research: interrelations between the geometrical parameters of partially regular microreliefs, their formation regimes, and surface quality parameters – microhardness, roughness, and oil-retaining capacity.

The main hypothesis states that ensuring the required operational characteristics of friction pair working surfaces necessitates optimizing their geometrical parameters, specifically by creating partially regular microreliefs with specified geometry, which guarantee the required microhardness and roughness values, as well as determining the optimal formation regimes.

The scientific value lies in determining the influence of groove geometrical parameters of partially regular microreliefs, their relative positioning, and feed rate of the deforming element on the relative microrelief area.

In the first chapter of the dissertation provides an analysis of the causes of changes in operational properties of the studied objects, particularly the reasons for defects in friction pairs of automotive units such as continuously variable transmissions (CVTs) and piston–cylinder mechanisms of internal combustion engines. It was established that the origin of these defects is the same – high specific pressures on the friction pair surfaces, elevated operating temperatures, and lack of lubrication, which lead to scuffing. As a working hypothesis, it was proposed to prevent secondary adhesion (galling) on heavily loaded friction pairs by creating regular microreliefs. The chapter also analyzes the main technological approaches to enhancing the operational properties of machine part working surfaces, as well as the latest research and publications in this field, which allowed formulating the dissertation tasks.

In the second chapter of the dissertation describes the research algorithm. Theoretical justification of parameters of regular microreliefs formed on flat surfaces is provided. An analytical dependence was obtained to determine the path traversed by the deforming element per quarter spindle revolution under given formation regimes. Analytical expressions were derived to calculate the relative surface area with regular microrelief (parallel grooves on flat surfaces). Conditions of microrelief formation depending on geometrical and technological parameters were established. Graphs of

the dependence of the relative vibro-burnishing area F_v on longitudinal tool feed S_{pz} and oscillation frequency $n_{\text{ДВ.х}}$ were constructed, as well as graphs of F_v dependence on groove pitch t_k . Schemes of formation for partially regular microreliefs with non-intersecting grooves (Type I) and intersecting grooves (Type III) were considered.

In the third chapter of the dissertation presents experimental studies on the influence of microrelief type and formation regimes on surface geometrical and operational characteristics. For this purpose, modeling was carried out in MathCAD, and 31 test samples with microreliefs of different types (I, II, III) formed at different feed rates (500, 1000, 1500 mm/min) were produced. A specially designed tool and HAAS TM 1 CNC machining center were used. The dependent variables were standardized surface profile parameters: R_{zx} , R_{ak2} , and $R_{mc(25\%)}$. Regression analysis yielded mathematical models describing the influence of studied factors. ANOVA methodology was again applied to assess both direct and interactive effects of factors.

In the fourth chapter of the dissertation is devoted to experimental investigations of microhardness and microstructure of surfaces with partially regular microreliefs. The purpose was to determine the influence of microrelief type and feed rate on the microstructure of the surface layer and groove vicinity microhardness. Test specimens with regular microreliefs of different types (I, II, III) formed at different feed rates (500, 1000, 1500 mm/min) were prepared. Microhardness was measured both at ridges and groove bottoms. ANOVA-based analysis revealed the influence of microrelief type and feed rate on microhardness. Interaction graphs were plotted, and microhardness distribution patterns near grooves were determined. Results showed non-uniform distribution, with Type II microrelief yielding the most favorable outcome in terms of uniformity.

Keywords: : regular microrelief; wear; forming modes; geometric parameters; quality parameters; operational parameters; evaluation; tool; strain rate; stress-strain state; mechanical properties; technology; operational properties; lubrication; plastic deformation.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, які відображають основні наукові результати дисертації

1. Dzyura V., Maruschak P., Slavov S., Dimitrov D., Semehen V., Markov O. Evaluating Some Functional Properties of Surfaces with Partially Regular Microreliefs Formed by Ball-Burnishing. *Machines*. 2023. Vol. 11. 633. DOI: 10.3390/machines11060633. (**Scopus Q2**) *(Здобувач провів аналіз геометричних параметрів дослідних зразків та встановив основні параметри мікрогеометрії поверхні).*

2. Dzyura V., Maruschak P., Semehen V., Kruk O., Gurey V. Analysis of Causes that Lead to Failure of Conical Discs of Variable Automatic Transmissions. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2024. DOI: 10.1007/s11668-024-01912-y (**Scopus Q3**) *(Здобувач провів розрахунок геометричних параметрів мікрорельєфу на поверхні диска варіатора).*

3. Slavov S. D., Dimitrov D. M., Mincheva D. Y., Dzyura V., Maruschak P., Semehen V. Microstructure and Microhardness Research of Steel 304 After Forming Partially Regular Reliefs by Ball Burnishing Operation. *Materials*. 2025. Vol. 18. 1565. DOI: 10.3390/ma18071565 (**Scopus Q2**) *(Здобувач провів аналіз результатів мікротвердості поверхні дослідних зразків та оцінював вплив окремих параметрів на мікротвердість).*

4. Дзюра В. О., Марущак П. О., Семеген В. О., Головка В. В., Федів В. Я. Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів, сформованих на плоских поверхнях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч. 1. С. 37–47. (**Фахове видання України**) *(Семеген В.О. – вивів аналітичні залежності для розрахунку відносної площі регулярних мікрорельєфів. Дзюра В.О., Марущак П.О. – постановка та формування завдань дослідження; Головка В.В. – оформлення графіків; Федів В.О. – верстка та оформлення статті).*

5. Дзюра В. О., Семеген В. О. Розрахунок відносної площі регулярних мікрорельєфів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2024. №

4(339). С. 222–229. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-339-4-35. (**Фахове видання України**) (*Здобувач вивів аналітичні залежності для розрахунку відносної площі регулярних мікрорельєфів*).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Дзюра В. О., Семеген В. О. Сучасні проблеми та напрями покращення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин. Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 90-річчю від дня народження проф. Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю каф. техн. механіки та с.-г. машин, Тернопіль, 29–30 верес. 2022 р. / М-во освіти і науки України, Терн. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 193. (*Здобувачем встановлено вплив параметрів мікрорельєфу на експлуатаційні властивості поверхонь пар тертя*).

7. Дзюра В. О., Семеген В. О. Аналіз причин утворення дефектів на поверхнях деталей автомобільних варіаторів. Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали доповідей, 19–20 жовт. 2022 р. Рівне: НУВГП, 2022. С. 241–242. Електронне видання. (*Здобувачем проведено аналіз механізму утворення експлуатаційного дефекту*).

8. Дзюра В. О., Семеген В. О., Федів В. Я., Крук О. Ю., Марущак П. О. Аналіз причин утворення поверхневих дефектів на робочих поверхнях конусних дисків варіаторних трансмісій. Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту. Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: матеріали конф., Центральноукраїнський національний технічний університет, 22–24 листоп. 2023 р. С. 156–157. (*Здобувачем запропоновано технологію, що запобігає утворенню описаного експлуатаційного дефекту*).

9. Дзюра В. О., Бица Р. О., Семеген В. О. Аналіз сучасних тенденцій вдосконалення топографії поверхонь деталей машин для забезпечення їх

експлуатаційних властивостей. Технічний прогрес в АПВ: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 2024. С. 324–328. *(Здобувачем проведено аналіз публікацій та визначено, що швидкість деформування є визначальним параметром при формуванні канавок).*

10. Бица Р., Семеген В., Крук О. Властивості регулярних мікрорельєфів як засобу забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин. Прикладна механіка: матеріали I Міжнар. наук.-техн. конф., присвяч. 80-річчю з дня народження проф. Чеслава Вікторовича Пульки, 6–7 черв. 2024 р. С. 12–14. *(Здобувачем визначено один з напрямів подальшого вдосконалення регулярних мікрорельєфів).*

11. Семеген В. О. Характеристики відносної площі деяких квазірегулярних мікрорельєфів, сформованих вібраційним обкочуванням. Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту, 20–22 жовт. 2025 року: зб. наук. пр. [Електронний ресурс] / М-во освіти і науки України, Вінниц. нац. техн. ун-т [та ін.]. Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 435–437.

Публікації, які додатково відображають результати дисертації

12. Дзюра В. О., Марущак П. О., Семеген В. О., Палюх А. Я., Марущак О. В., Ціцюра О. І. Спосіб формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обкочуванням: пат. 153223 Україна. № u202203830; заявл. 13.10.2022; опубл. 08.06.2023, Бюл. № 23/2023. *(Здобувач запропонував принципову схему способу формування регулярного мікрорельєфу).*

ЗМІСТ

| | | |
|-----|--|----|
| | АНОТАЦІЯ | 2 |
| | ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ | 15 |
| | ВСТУП | 17 |
| 1 | Розділ 1 | |
| | АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СПОСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ | |
| 1.1 | Аналіз причин зміни експлуатаційних властивостей об'єктів дослідження | 23 |
| 1.2 | Технологічні способи та методи забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин | 33 |
| 1.3 | Аналіз останніх досліджень та публікацій в напрямі забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин технологічними методами | 37 |
| 1.4 | Висновки та постановка завдань досліджень | 49 |
| 2 | Розділ 2 | |
| | ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ, СФОРМОВАНИХ НА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНЯХ | |
| 2.1 | Структура та алгоритм проведення дослідження | 51 |
| 2.2 | Розрахунок відносної площі мікрорельєфу з канавками, що дотикаються | 52 |
| 2.3 | Визначення відносної площі регулярних та частково регулярних мікрорельєфів із різною міжосьовою відстанню канавок | 62 |
| 2.4 | Висновки до розділу 2 | 71 |

Розділ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ МІКРОРЕЛЬЄФУ ТА РЕЖИМІВ ФОРМУВАННЯ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХОНЬ

- | | | |
|-----|---|-----|
| 3.1 | Планування експериментальних досліджень впливу типу мікрорельєфу та режимів формування на геометричні та експлуатаційні властивості поверхонь | 73 |
| 3.2 | Інструмент та обладнання для проведення експериментальних досліджень | 80 |
| 3.3 | Результати експериментальних досліджень впливу типу мікрорельєфу та режимів формування на геометричні та експлуатаційні властивості поверхонь | 83 |
| 3.4 | Аналіз та оцінка основних ефектів та взаємодій | 92 |
| 3.5 | Дослідження впливу типу мікрорельєфу та режимів формування на маслоємність поверхонь з регулярним мікрорельєфом | 95 |
| 3.6 | Висновки до розділу 3 | 101 |

4.1 Розділ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ ТА МІКРОСТРУКТУРИ ПОВЕРХОНЬ З ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНИМИ РЕЛЬЄФАМИ

- | | | |
|-----|--|-----|
| 4.1 | Передумови проведення дослідження мікротвердості поверхонь з частково регулярними мікрорельєфами | 103 |
| 4.2 | Початкова мікроструктура та вимірювання мікротвердості поверхні з ЧРМР | 106 |
| 4.3 | Планування експериментальних досліджень | 107 |
| 4.4 | Аналіз результатів експериментальних досліджень | 111 |
| 4.5 | Аналіз мікроструктури деформованого поверхневого шару | 112 |
| 4.6 | Одержані регресійні моделі та їхній статистичний аналіз | 114 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.6.1 | Вплив факторів на мікротвердість, отриману в зоні виступів канавок ЧРМР | 114 |
| 4.6.2 | Діаграми основних ефектів та взаємодій | 117 |
| 4.7 | Спосіб формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обкочуванням | 118 |
| 4.8 | Характеристики відносної площі деяких квазірегулярних мікрорельєфів сформованих вібраційним обкочуванням | 122 |
| 4.9 | Висновки до розділу 4 | 125 |
| | ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 127 |
| | ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ | 130 |
| | ДОДАТКИ | 144 |

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

- ЧРМР – частково регулярні мікрорельєфи;
РМР – регулярні мікрорельєфи;
 $\varphi_{кр}$ – кут повороту кривошипа;
 $n_{шп}$ – частота обертання шпинделя;
 l – довжина шатуна;
 V_k – швидкість деформувального елемента;
 i_0 – кількість деформувальних елементів;
 A_k – амплітуда канавок мікрорельєфу;
 $S_{пзоп}$ – поздовжня подача інструменту при обкатуванні;
 $n_{дв.х}$ – частота осциляцій;
 $e_{кр}$ – ексцентриситет привідного кулачка;
 d_k – діаметр кульки (деформувального елемента);
 F_δ – зусилля деформування;
 ρ – ширина канавки;
 F_e – відносна площа мікрорельєфу;
 t_k – крок канавки;
 R_a – середнє арифметичне відхилення профілю у відповідності до ISO 21920-2:2021;
 R_{zx} , – висота нерівностей профілю по 10 точках у відповідності до ISO 21920-2:2021;
 $R_{mc(25\%)}$ – відносна опорна довжина профілю при 25% зносу матеріалу у відповідності до ISO 21920-2:2021;
 R_k, R_{pk} , – група параметрів R_k у відповідності до ISO 21920-2;
 R_{vk} ,
 R_{mrk1} та
 R_{mrk2}

- c, i – відповідно індекси рівнів загальної висоти та кількість вимірних значень на відрізьку довжини оцінювання профілю поверхні;
- R_t – загальна висота профілю поверхні;
- l_e – довжина оцінювання профілю поверхні;
- R_{ml} – довжина оцінювання профілю поверхні на заданому c рівні;
- Δ – дискретна довжина вздовж осі x вимірної профілограми;
- $HV_{0.05}$ – мікротвердість за шкалою Вікерса при навантаженні 50г;
- $HV_{0.01}$ – мікротвердість за шкалою Вікерса при навантаженні 10г;
- f – подача деформувального елемента;
- F – деформуюча сила;

ВСТУП

Актуальність теми. Постійно зростаючі вимоги до збільшення ресурсу вузлів та агрегатів вимагають збільшення вимог до якості та експлуатаційних властивостей робочих поверхонь відповідальних деталей. Підвищення зносостійкості та довговічності високонавантажених пар тертя є одним із основних завдань сучасного машинобудування.

Класичним підходом для забезпечення високої якості поверхні є зменшення її шорсткості, параметри якої регламентують відповідними стандартами і відносно коефіцієнта тертя спряжених поверхонь. Однак у випадку високих питомих тисків та високих робочих температур неминучим є поява адгезії між спряженими поверхнями, яка призводить до утворення поверхневих дефектів навіть при нетривалих перевантаженнях. Тому використання класичного підходу до забезпечення якості робочих поверхонь важко навантажених пар тертя є недоцільним.

Одним з основних наукових підходів підвищення зносостійкості поверхонь тертя є формування регулярного мікрорельєфу – сітки каналів невеликої глибини сформованої на поверхні робочих елементів деталей машин для забезпечення ряду суттєвих переваг. Сучасне обладнання дозволяє формувати такі мікрорельєфи з високою точністю на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням. Однак вартість такого обладнання є досить високою, а час формування мікрорельєфу – довшим у порівнянні з вібраційними методами формування, які базуються на механічному коливному русі віброобкатника з певною амплітудою. Такий метод формування мікрорельєфу є більш продуктивнішим при формуванні мікрорельєфу простих форм, особливо на плоских поверхнях, що задовольняє умови масового виробництва не надто відповідальних поверхонь.

Тому підвищення зносостійкості та довговічності високонавантажених пар тертя є одним із основних завдань сучасного машинобудування.

Усі ці та багато інших технічних задач потребують вирішення для

покращення експлуатаційних параметрів робочих поверхонь пар тертя та збільшення ресурсу відповідальних вузлів та агрегатів машин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано згідно з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки України «Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій», а також ініціативної НДР «Наукові основи покращення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей технологічними методами» №0125U003762.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розвиток наукових підходів забезпечення параметрів якості плоских робочих поверхонь деталей машин з регулярними мікрорельєфами, відповідно, їх зносостійкості й маслоємності технологічними методами на основі аналізу умов експлуатації.

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

- визначити закономірності формування регулярних мікрорельєфів різних типів в залежності від заданих геометричних параметрів та режимів формування;

- дослідити вплив типу мікрорельєфів та технологічних режимів його формування на геометричні параметри шорсткості поверхні та визначити діапазони режимів, що забезпечують мінімальну шорсткість поверхні;

- дослідити вплив типу мікрорельєфів та технологічних режимів його формування на маслоємність поверхонь як одного з основних експлуатаційних параметрів, що визначає умови роботи пари тертя через побудову діаграм зношування (кривих Аббота-Фастоуна). При цьому визначити діапазони режимів, що забезпечують максимальну маслоємність поверхонь;

- визначити вплив типу мікрорельєфу та режимів його формування на фізико-механічні параметри якості поверхні, зокрема її мікротвердість в околі канавки.

Об'єктом дослідження є процес формування канавок частково регулярного мікрорельєфу на плоских поверхнях пар тертя.

Предметом дослідження є взаємозв'язки між геометричними параметрами частково регулярного мікрорельєфу, режимами його формування та параметрами якості поверхні – мікротвердістю, параметрами шорсткості та маслоємністю.

Методи дослідження. При виконанні роботи теоретичні дослідження проведено із використанням елементів теорії малих вибірок, теорії проведення експериментальних досліджень та статистичного аналізу даних.

Планування та опрацювання результатів експериментальних досліджень встановлення закономірностей впливу режимів оброблення походились із використанням теорії багатofакторного регресійного аналізу за методикою аналізу ANOVA.

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

Наукова новизна отриманих результатів полягає в отриманні аналітичних та регресійних залежностей впливу режимів формування та геометричних параметрів мікрорельєфу на експлуатаційні параметри та параметри якості поверхонь з регулярними мікрорельєфами:

- отримано аналітичні залежності, які дозволяють визначити вплив режимів формування та геометричних параметрів регулярних та частково регулярних мікрорельєфів із трикутною формою канавок на відносну площу мікрорельєфу для мікрорельєфів I, II та III типів сформованих на плоских поверхнях вібраційним обкочуванням;

- отримано регресійні залежності впливу типу мікрорельєфу та подачі інструменту на параметри шорсткості та маслоємності поверхні з сформованими регулярними мікрорельєфами;

- отримано регресійні залежності впливу типу мікрорельєфу та подачі інструменту на мікротвердість поверхні із сформованими регулярними мікрорельєфами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що прийняті технічні рішення створили комплексну основу для вибору раціональних режимів формування регулярних та частково регулярних мікрорельєфів в залежності від значення параметра якості (шорсткості, мікротвердості) чи маслоємності який необхідно забезпечити.

На основі аналізу профілограм поверхонь з регулярними мікрорельєфами, встановлено оптимальні значення подач інструменту з деформувальним елементом та геометричні параметри мікрорельєфу, зокрема його тип, при якому забезпечуються максимальні значення маслоємності поверхні.

Встановлено закономірності впливу подачі інструменту з деформувальним елементом на зміну параметрів шорсткості R_a , R_z , R_{ak} , R_{vk} , $R_{mc(25\%)}$ поверхонь з регулярними мікрорельєфами.

Встановлено закономірності впливу подачі інструменту з деформувальним елементом та типу мікрорельєфу на зміну мікротвердості поверхонь з регулярними мікрорельєфами.

Розроблено принципову схему формування регулярного мікрорельєфу з накладанням зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярного напрямку руху подачі.

Результати дисертаційного дослідження у вигляді методики розрахунку параметрів регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях впроваджено на ТзОВ «Булат» (м. Тернопіль). Також результати дослідження оптимальних параметрів частково регулярних мікрорельєфів при забезпеченні маслоємності поверхонь пар тертя впроваджено на кафедрі автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Окремі методики для оцінювання параметрів якості поверхонь впроваджено в навчальний процес на кафедрі автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Технічні рішення захищені патентом на корисну модель України.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи отримано здобувачем самостійно, постановку

завдань, аналіз і трактування результатів – спільно з науковим консультантом. У технічних рішеннях частка всіх співавторів однакова.

В наукових працях, опублікованих із співавторами, автору дисертації належать: у [1] – аналіз геометричних параметрів дослідних зразків та встановив основні параметри мікрогеометрії поверхні, у [2] – розрахунок геометричних параметрів мікрорельєфу на поверхні диска варіатора; у [3] – аналіз результатів мікротвердості поверхні дослідних зразків та оцінка впливу окремих параметрів на мікротвердість поверхні; у [4, 5] – отримання аналітичних залежностей для розрахунку відносної площі регулярних мікрорельєфів; у [6] – встановлення впливу параметрів мікрорельєфу на експлуатаційні властивості поверхонь пар тертя, у [7] – аналіз механізму утворення експлуатаційного дефекту [8] – запропоновано технологію, що запобігає утворенню описаного експлуатаційного дефекту схоплювання II роду; у [9] – аналіз публікацій та визначення найбільш впливових параметрів на експлуатації властивості поверхні із РМР; у [10] – визначено один з напрямів подальшого вдосконалення регулярних мікрорельєфів; у [11] розглянуто процес формування канавок мікрорельєфу на віброобкатаних поверхнях та визначено його відносну площу як співвідношення площі канавок до загальної площі оброблюваної поверхні, з врахуванням стохастичного характеру подачі на токарних і свердлильних верстатах, що впливає на геометрію канавок; у [12] – запропоновано принципову схему способу формування регулярного мікрорельєфу.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи апробовано на наукових конференціях Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя (м. Тернопіль, 2022–2024 рр.), на конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем» (м. Рівне, 2022), на конференції «Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту» (м. Кропивницький, 2022).

У цілому роботу представлено та обговорено на університетському науково-технічному семінарі № 6 «Машинобудування, машинознавство та

обробка матеріалів» у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

На всіх зазначених семінарах робота отримала позитивну оцінку.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 12 наукових працях, із них 2 – у фахових наукових періодичних виданнях України категорії В, 3 наукових статей у міжнародних журналах, індексованих у наукометричній базі Scopus, 6 – матеріали наукових конференцій. Отримано 1 – патент на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Основний зміст викладено на 113 сторінках друкованого тексту. В роботі 106 рисунків, 37 таблиць, а також 14 додатків, список посилань містить 117 найменувань.

Розділ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СПОСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

1.1 Аналіз причин зміни експлуатаційних властивостей об'єктів дослідження

Постійно зростаючі вимоги до збільшення ресурсу вузлів та агрегатів вимагають збільшення вимог до якості та експлуатаційних властивостей робочих поверхонь відповідальних деталей. Підвищення зносостійкості та довговічності високонавантажених пар тертя є одним із основних завдань сучасного машинобудування.

Різноманіття деталей сучасного машинобудування ніколи раніше не досягало такої технологічної складності як сьогодні. Зараз в машинобудуванні не достатньо забезпечити задані геометричні параметри деталей із заданою точністю. Однією з основних задач сучасного машинобудування є необхідність формування функціональних поверхонь деталей машин, які будуть забезпечувати задані експлуатаційні властивості протягом усього періоду експлуатації деталі. Відповідно, технологічні процеси, що забезпечують оброблення таких поверхонь та формування заданих параметрів якості, що забезпечуються ці експлуатаційні властивості називаються функціонально-орієнтованими технологічними процесами. Такі технологічні процеси були досліджені в роботах Ступницького В.В., [113], Михайлова А.Н. [112] та інших вчених.

Яскравим прикладом деталей, що працюють у важких умовах експлуатації є деталі автомобільних двигунів та коробок передач. Гільзи циліндрів двигунів внутрішнього згорання, шестерні, привідні конусні диски автомобільних трансмісій – деталі, що працюють у надважких умовах експлуатації. В автомобільній промисловості все більшого поширення набувають безступінчасті

варіаторні трансмісії, основними робочими елементами яких є конусні привідні елементи, які наближено можна вважати дисками. Найпоширеніше застосування такі деталі отримали у варіаторах JF011E, які використовуються на автомобілях Dodge Caliber, Nissan X-trail, Nissan Qashqai, Nissan Teana, Nissan Tiida, Mitsubishi Lancer, Mitsubishi Outlander, Mitsubishi Galant, Mitsubishi GalantASX, Peugeot 4007, Renault Scenic, Renault Megane, Renault Fluence, Renault Koleos, а також на варіаторах JF015E, які використовують на автомобілях Nissan Juke, Nissan Micra, Suzuki Swift. Використання на таких поверхнях регулярного мікрорельєфу дозволить збільшити ресурс роботи трансмісії і зменшити витрати на експлуатацію згаданих автомобілів. Крутний момент, який передають такі варіатори коливається в межах 140-170 Н·м.

Варіаторна коробка передач відноситься до класу безступінчастих трансмісій (CVT) [33]. Різні конструкції варіаторів у автовиробників мають власні назви: Autotronic від Mercedes-Benz; Ecotronic, Durashift CVT від Ford; Lineartronic від Subaru; Multidrive від Toyota; Multimatic від Honda; Multitronic від Audi; Xtronic, Hyper від Nissan.

Конусні фрикційні варіатори завдяки ряду технічних переваг використовуються не лише в автомобілях. В якості привідного паса для автомобільних трансмісій використовують збірні на металевій стрічці металеві пластини складної форми. Великого поширення набули варіаторні автоматичні трансмісії із привідним пасом у вигляді клинового ременя. Їх використовують у скутерах, мопедах, снігоходах та сільськогосподарській техніці [63].

В роботі [3] описано можливості вдосконалення CVT шляхом мінімізації сил затиску варіатора. Це досягли за технологією контролю проковзування. Такий підхід забезпечує найкращу можливу ефективність трансмісії в поєднанні з покращеною стійкістю до пошкоджень від проковзування. Авторами описано зв'язок між проковзуванням паса варіатора та функціональними властивостями трансмісії. Визначено умови оптимальної продуктивності, ефективності та міцності. Проведені експериментальні дослідження свідчать про те, що зменшення сили затиску паса до дуже низьких значень є необхідною умовою

зростання ефективності за низького крутного моменту. При цьому невирішеним залишається проблема пошуку оптимальної сили затиску в умовах низького навантаження, зберігаючи при цьому швидку гідравлічну реакцію.

Дослідження зусилля затиску наведені також в роботі [5]. Встановлено, що перевага від ефективності втрачається через неефективність самого CVT, зокрема через втрати, що виникають головним чином у (гідравлічній) системі приводу та у варіаторі. Втрати можна зменшити, мінімізувавши силу затиску шківів на ремені. Встановлено, що занадто велике зниження сили затиску також зумовлює значне проковзування між ременем і шківом, що спричиняє пошкодження системи.

Контролюючи силу затиску таким чином, щоб дозволити обмежену кількість ковзання, зусилля затиску можна мінімізувати без ризику пошкодження системи конусних дисків та привідного паса. Для керування ковзанням у варіаторі використовують нелінійну схему керування. Цей метод керування є стійким до піків крутного моменту.

У роботі [25] проаналізовано параметри надійності автомобільного варіатора. Встановлено, що працездатність варіатора забезпечується якістю поверхневого шару, точністю виготовлення, мікрорельєфом поверхні шківів і сталевих клинових пасів. Вирішальним фактором у забезпеченні надійності варіатора є техніка обробки шківів. Було запропоновано створити регулярні мікрорельєфи на готовій поверхні шківів за допомогою лазерної абляції, які діють як мікро канали для покращення дренажу масла з контактної структури. Створення масляних каналів на поверхні шківів методом лазерного випікання забезпечує їх розташування та дозволяє отримати заздалегідь задану схему, напрямок, глибину та довжину каналів.

Найповніше особливості будови та експлуатації, переваги, недоліки та типові пошкодження робочих поверхонь описано в роботі [3]. В ній запропоновано аналітичні залежності для розрахунку основних конструктивних параметрів елементів варіаторних трансмісій. Також описана будова систем

цього виду коробок передач з наведенням алгоритмів та графіків, які характеризували їх роботу.

Методологія проведення досліджень базувалась на аналізі експлуатованої поверхні конусних дисків варіаторних трансмісій до експлуатації і після утворення дефектів, які призвели до виходу її з ладу. Об'єктом дослідження були зразки розміром 20×20 мм, отримані з конусів варіаторних трансмісій варіатора Jatco JF011E. Ресурс до настання відмови – 110 тис. км. Фрактографічні особливості зношування поверхні конусів варіаторної трансмісії досліджували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

Фрактографічний контроль поверхні дисків.

Технічні вимоги, що ставляться до конусних елементів конструкцій (дисків) варіатора регламентуються відповідними галузевими стандартами і є наступними:

– биття конічної робочої поверхні дисків не повинно перевищувати 0,05 мкм;

– шорсткість конусної робочої поверхні дисків (середнє арифметичне відхилення профілю R_a) не повинно перевищувати 0,8 мкм;

Крутний момент у варіаторній трансмісії передається з веденого вала до ведучого за допомогою привідного паса або ланцюга, які взаємодіють з веденою та ведучою конічною напівмуфтами.

Контактна взаємодія привідних елементів трансмісії, неправильні умови експлуатації і, як наслідок, перевищення робочих температур призводять до швидкого зношування робочих поверхонь. Відомі основні конструктивні особливості привідних пасів варіаторних трансмісій, а також причина утворення дефектів на поверхні конусних дисків, якою є неоптимальне значення зусилля натягу привідного паса.

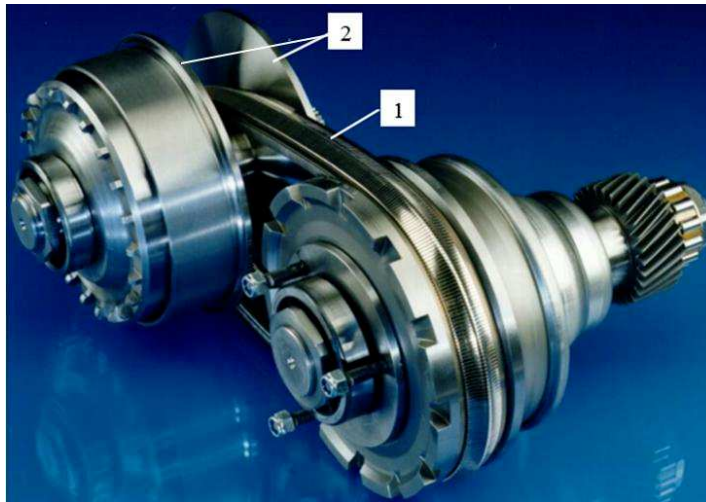


Рисунок 1.1. Загальний вигляд автомобільного варіатора
(Stan van der Meulen, 2010):

1- пас (стрічка) ; 2 – конусні диски

Відомо, що на поверхні паса варіатора, який складено з металевих пластин є насічки, рис. 1.2а. Саме завдяки ним, цей пас добре контактує зі конусами варіатора. Якщо ці насічки стерлись, пас починає проковзувати, що спричиняє втрати переданого крутного моменту, рис. 1.2 б. За наявності цих явищ, поверхня конусів інтенсивніше зношується, інтенсифікується також знос поверхні паса. Стирання насічок поверхні паса та поверхні конусів, рис. 1.2 в, спричиняє формування металевого пилу, який потрапляє у мастило. Частково цей пил затримується у фільтрі, але значна його кількість є достатньо дрібнодисперсна, щоб перебувати у мастилі у вигляді завислих частинок. Цей металевий пил потрапляє у клапан масляного насоса, який є важливим елементом варіаторного приводу. Клапан встановлено у середині насоса, зазори у якому мають високу точність.

Потрапляння металевого пилу у клапан спричиняє його підклинювання, що зумовлює проблеми з тиском мастила. При цьому, в циліндрі клапана виникають задири. Тиск мастила знижується, що спричиняє зростання коефіцієнту тертя. Це інтенсифікує знос робочих поверхонь і зумовлює виникнення ще більшої кількості металевого пилу і формування подряпин, рис. 2 г. Глибше пояснення механізмів зношування конусів і паса можна знайти в [43]. Під час фрикційного

контакту виникають складні фізико-хімічні явища, кінетика перебігу яких визначається значною кількістю кінематичних і силових факторів. Спільним для них є те, що якщо тиск мастила порушується, варіатор зношується дуже швидко, що спричиняє необхідність заміни конусів, паса, насоса, ремонту гідро блоку.

Однією з основних причин виходу з ладу трансмісії є утворення на робочих поверхнях конусів задирів, потертостей та інших дефектів, які виникають в процесі експлуатації. Причиною утворення цих дефектів є захоплення матеріалів робочих поверхонь конусів варіатора з матеріалом пластин привідного ланцюга.



(а)



(б)



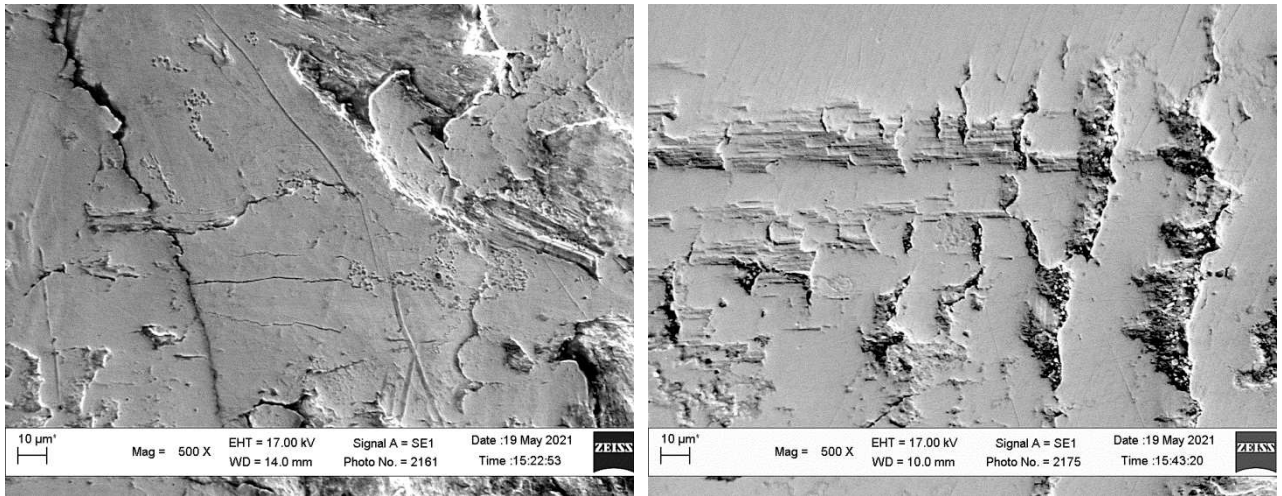
(в)



(г)

Рисунок 1.2. Робочі поверхні паса (а, б) та дисків варіаторних трансмісій виробництва Jatco [19]

а) перед початком експлуатації; б) після настання дефектів, які призводять до відмови



а)

б)

Рисунок 1.3. Мікроструктура пошкодженої робочої поверхні конусного диска варіаторної трансмісії на різній відстані від центру диска [19]

а – ближче до центра обертання диска; б – ближче до периферії диска

Запобігання утворення поверхневих дефектів на поверхнях конусних дисків варіаторних трансмісій потребує аналізу умов роботи пари «конусний диск-металевий привідних пас» та процесів, які передують утворенню дефектів.

Аналогічні дефекти виявлено при аналізі зношених деталей циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згорання автомобіля KIA Sportage 2022 (рис. 1.4).

Оскільки граничний стан поршня ДВЗ автомобіля Kia Sportage досягнуто внаслідок схоплювання, природу цих дефектів описано докладніше. Як зазначалося, причинами утворення схоплювання були високі питомі тиски та робочі температури, за яких температурний поріг схоплювання поверхонь пари тертя є невисоким. Сприяють схоплюванню продукти зношування, які зазвичай бувають у мастилі в зоні контакту пари тертя. За таких умов поверхня пари тертя мала досить низьку стійкість до зсувної пластичної деформації. На поверхні

помітно значно деформований шар тертя, матеріал «потік» під впливом контр тіла.

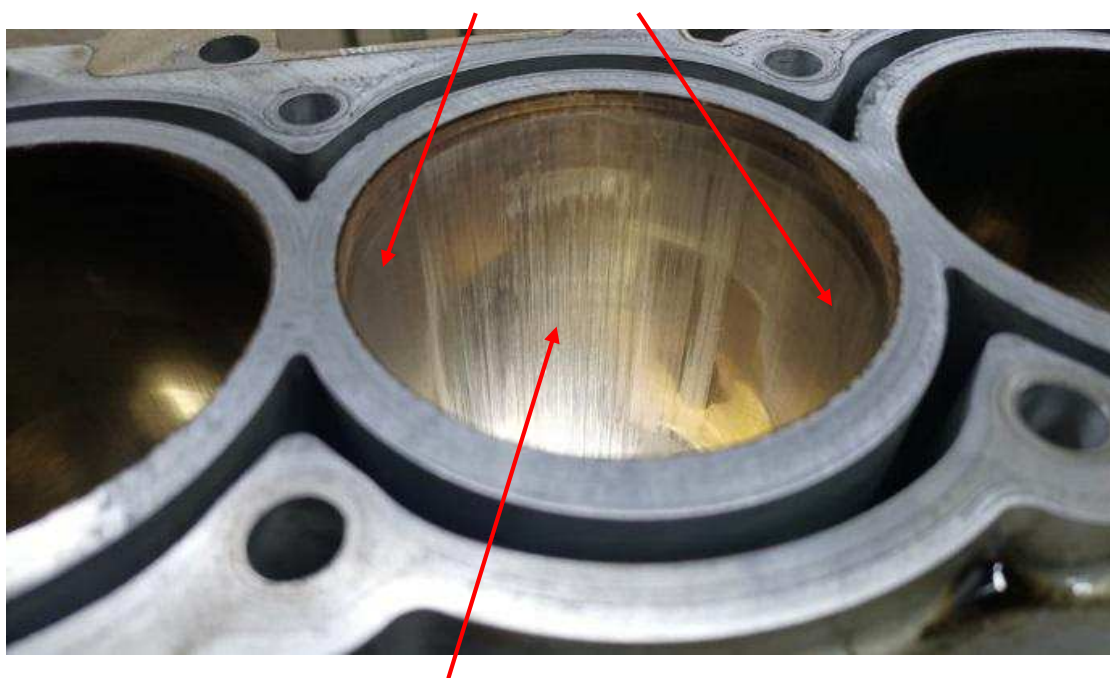


а



б

Зони без зношування



Зона активного зношування

Рисунок 1.4. Вигляд пошкодженого внаслідок експлуатації поршня ДВЗ автомобіля Kia Sportage 2022 р.в.

Причини виникнення дефектів та їх морфологія наступні. Виявлено, що є 2 причини утворення експлуатаційних дефектів на поверхнях дисків варіатора:

- порушення режимів експлуатації трансмісії – до них зокрема належать: неправильна експлуатація: швидке прискорення транспортного засобу; порушення регламенту заміни мастил; тривала експлуатація за високої температури зовнішнього середовища.

- тривала експлуатація – за тривалої експлуатації і високих температур в зоні трибоконтракту, перегріву і високих питомих тисках, які прискорюють зношування та утворення дрібнодисперсних часток металу в робочому середовищі, щ активує процес пошкодженості трансмісії.

Отже, внаслідок таким умов експлуатації виникають дефекти двох типів, які мають принципово різну природу походження, хоча і однакову дислокацію, див. табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Дефекти варіаторних трансмісій та методи їх діагностування

| Назва дефекту | Метод діагностики | | | Причина утворення |
|--------------------------------|-------------------|---------------|------------|--|
| | розрахунковий | реєстраційний | експертний | |
| Подряпини, риски та потертості | - | + | + | Проковзування привідного пасу (зношення, порушення режимів експлуатації) |
| Раковини, вириви | - | + | + | Тривала експлуатація, перегрів поверхні, схоплення поверхонь пари тертя (порушення швидкісного режиму, тривала їзда на високих швидкостях) |

Експлуатаційні дефекти та їх класифікаційні ознаки:

Подрятини, риски та потертості - виникають внаслідок проковзування металевого привідного паса по робочій поверхні конусного диска. Запобігти такому дефекту можна лише забезпечуючи плавне прискорення транспортного засобу (плавне натискання на педаль акселератора).

Раковини та вириви - є наслідком тривалої експлуатації трансмісії, що зумовлює її перегрів. При цьому в зоні контакту привідного паса і робочої поверхні конусного диска має місце процес адгезії (схоплювання), тобто прилипання поверхонь внаслідок дії високих температур.

Тож механізми утворення експлуатаційних дефектів для різних типів пар тертя, які зумовлені явищем схоплювання II роду є однаковими.

Лише дотримання умов експлуатації та застосування технологічних методів при виготовлення конусних дисків варіаторних трансмісій дозволить уповільнити швидкість накопичення дефектів та значно збільшити ресурс роботи вузла. Відомо чисельні технологічні підвищення ресурсу деталей, це застосування сучасних технологічних процесів, що забезпечують виготовлення деталей заданої точності і стабільності як за розмірами, так і за фізико-механічними властивостями поверхні.

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 1.2.

Таблиця 1.2 – 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%.

1.2 Технологічні способи та методи забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин

Традиційний метод покращення якості поверхні полягає в зменшенні її шорсткості, яка регламентується відповідними стандартами [10, 11,37], та в зниженні коефіцієнта тертя між контактуючими поверхнями пари тертя. Проте при високих питомих тисках і робочих температурах неминуче виникає адгезія між спряженими поверхнями, що призводить до появи дефектів навіть при короточасних перевантаженнях [74, 28]. Причому чим менше значення параметрів шорсткості поверхні тим з більшою ймовірністю поверхня набуде дефекту під назвою адгезійне схоплювання II роду, яке має місце при високих робочих температурах та питомих тисках. Таким чином, класичний підхід не є ефективним для забезпечення якості робочих поверхонь у важко навантажених вузлах тертя.

Взаємозв'язок між експлуатаційними властивостями поверхні і параметрами шорсткості описують кривою Аббота –Фаєрстоуна. Його описано в роботі [41], де оцінку експлуатаційних властивостей поверхні виконано не за шорсткістю поверхні, а за допомогою параметрів кривої Аббота –Фаєрстоуна. Автори стверджують, що три параметри, які можна визначити з цієї кривої R_{pk} , R_k і R_{vk} характеризують здатність поверхні до опору тертю ковзання.

Одним із сучасних наукових підходів до підвищення зносостійкості поверхонь тертя є створення регулярного мікрорельєфу – сітки неглибоких каналів на робочих поверхнях деталей машин, що надає ряд суттєвих переваг [32, 44]. Сучасне обладнання дозволяє з високою точністю формувати такі мікрорельєфи на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням.

Проте, це обладнання є дорогим, а процес формування мікрорельєфу займає більше часу порівняно з вібраційними методами, що базуються на механічному коливальному русі віброобкатника з певною амплітудою. Ці методи є більш ефективними для створення мікрорельєфу простих форм, особливо на плоских поверхнях, що відповідає умовам масового виробництва менш критичних поверхонь.

Обкатані поверхні мають добрий опір захопленню. У обкатаних поверхнях відношення, яке характеризує фактичну поверхню контакту деталей, які взаємодіють між собою r/R_{zmax} є в сотні разів більшим ніж у поверхонь оброблених шліфуванням чи тонким точінням [23, 32].

Крім цього у поверхнях на які нанесений регулярний мікрорельєф товщина масляної плівки в 1,5 – 2 рази більша ніж у зразків оброблених шліфуванням та фрезеруванням за рахунок утворення масляних кишень [61]. Однак створення на конусних поверхнях повністю регулярних мікрорельєфів є технологічно складним. Простіше формувати частково регулярні, за одним або декількома геометричними параметрами, наприклад осьовим кроком, кутовим кроком та ін.

Яскравим прикладом області застосування регулярних мікрорельєфів є пара гільза циліндра двигуна внутрішнього згорання – поршень. Елементи цієї пари працюють у важких умовах експлуатації.

Цікавою з точки зору проведення класифікацій є робота [58]. В ній наведено класифікацію напрямів наукових досліджень текстурованих поверхонь (рис. 1.5), зокрема: технологій створення регулярних мікрорельєфів; вхідних/вихідних характеристик таких поверхонь; моделювання їх взаємодії та подальших досліджень в цьому напрямі. Також в цій роботі наведено класифікацію основних методів створення текстурованих поверхонь, таких як методи термічної, механічної, електро-хімічної взаємодії, мікро- та нано фінішна обробка, мікро лиття. У статті наведено технологічні схеми процесів формування поверхневих мікроструктур із обґрунтуванням основних технологічних параметрів. Результатом проведених авторами досліджень є таблиця опису різних інструментальних матеріалів, робочих матеріалів і параметрів різання, що

використовуються при обробці за допомогою мікро текстурованого інструменту та таблиця методів генерації текстур разом із розмірами та геометрією канавок.

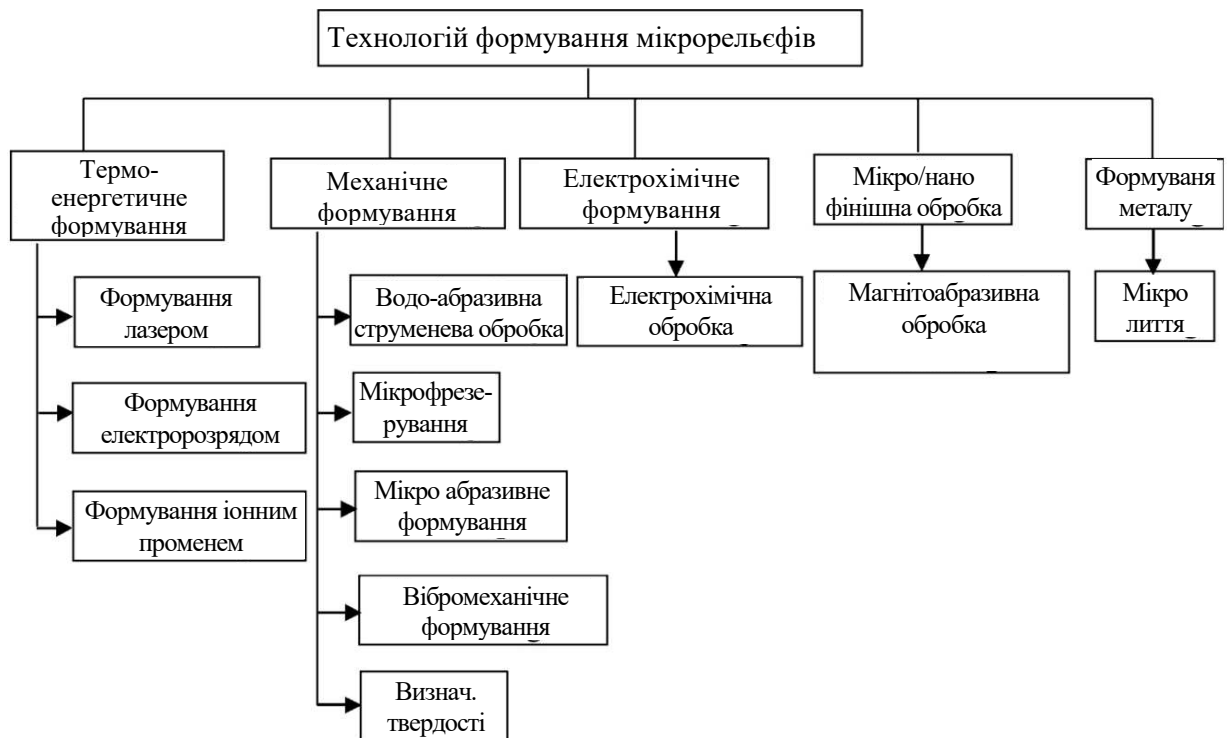


Рисунок 1.5 – Технологічні методи формування регулярних мікрорельєфів на робочих поверхнях деталей машин [58]

Технологію створення регулярного мікрорельєфу на плоских поверхнях запропоновано в роботі [70]. Використання спеціального інструменту з індентором у вигляді кульки з можливістю регулювання зусилля взаємодії на поверхню, створює на поверхні регулярний мікрорельєф із канавками синусоподібної форми. Таким чином на поверхні утворюється повністю регулярний мікрорельєф із комірками гексагональної форми (рис. 1.6).

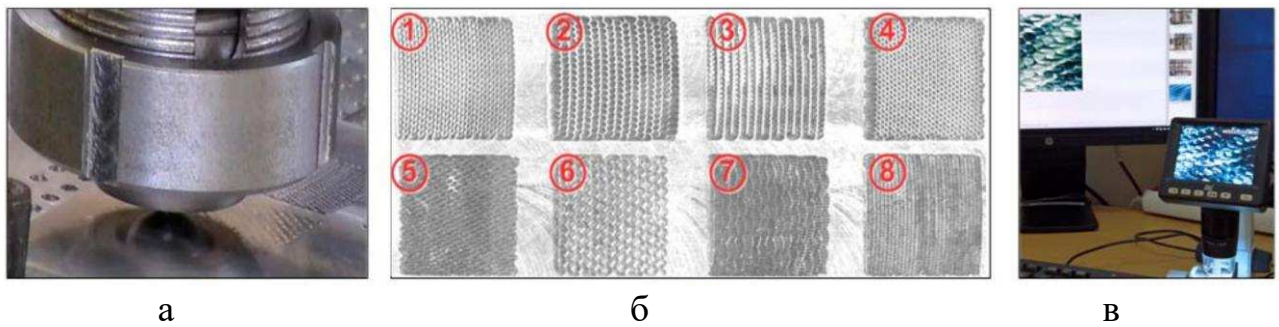
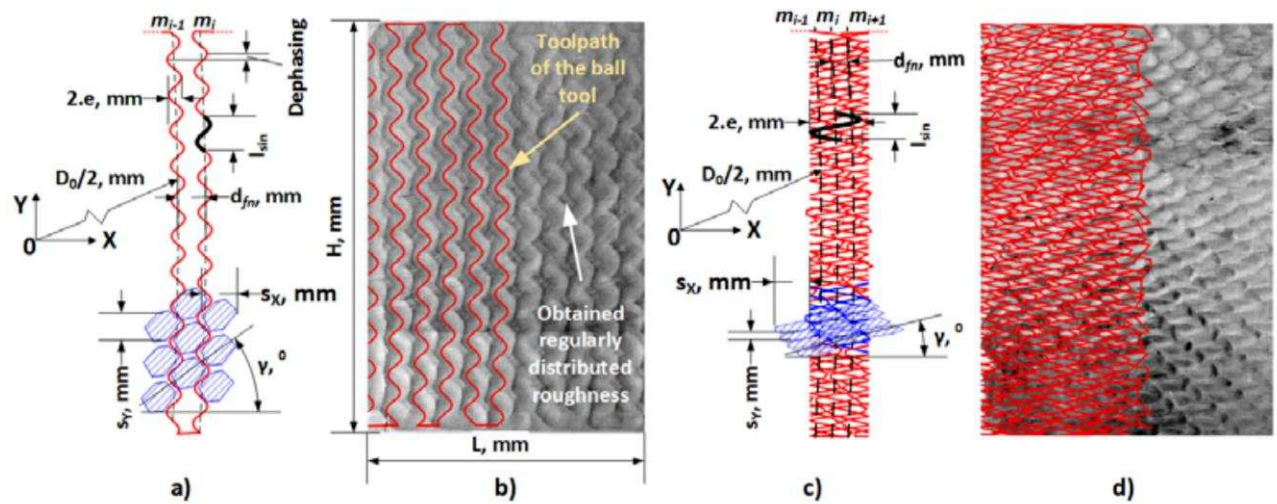


Рисунок 1.6. Процес формування регулярного мікрорельєфу на фрезерному верстаті з ЧПК [70]:

а – процес формування; б – отримані зразки регулярних мікрорельєфів;
в – зображення мікрогеометрії мікрорельєфу

Досліджено вплив основних технологічних параметрів на геометричні параметри створеного мікрорельєфу. Як видно із рис. 1.6 розробленим інструментом можливо формувати різноманітні типи регулярних мікрорельєфів із канавками довільної форми. Створенню мікрорельєфів передуює математичне моделювання форми та розмірів канавки у програмному забезпеченні MathCAD, яке дозволяє визначити координати вершин канавок. Ця інформація необхідна для складання керуючої програми для фрезерного верстату з ЧПК ТМ-1 технічна характеристика якого наведена у додатку 1 на якому використовувався розроблений інструмент. Попереднє математичне моделювання дозволяє нормувати геометричні параметри отриманого регулярного мікрорельєфу та розрахувати його відносну площу і, відповідно, знати експлуатаційні властивості поверхні із сформованим мікрорельєфом.

1.3 Аналіз останніх досліджень та публікацій в напрямі забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин технологічними методами

Аналіз наукових публікацій вказує на те, що сфери застосування функціональних поверхонь із регулярними мікрорельєфами є досить широкими. Найбільшого застосування поверхні із регулярними мікрорельєфами набули в машинобудуванні, де робочі поверхні працюють у складних умовах експлуатації (високі робочі температури, питомі тиски, відсутність належного змащування). Такі умови експлуатації мають місце у гільзах двигунів внутрішнього згорання, коробках автоматичних та механічних трансмісій. Досить значною областю використання поверхонь з регулярними мікрорельєфами є виробництво металообробного інструменту. Формування на робочих поверхнях інструментів мікрорельєфу дозволяє зменшити питомі тиски на поверхню, покращує відведення тепла та дозволяє здійснювати обробку металу при прогресивніших режимах оброблення (рис. 1.7).

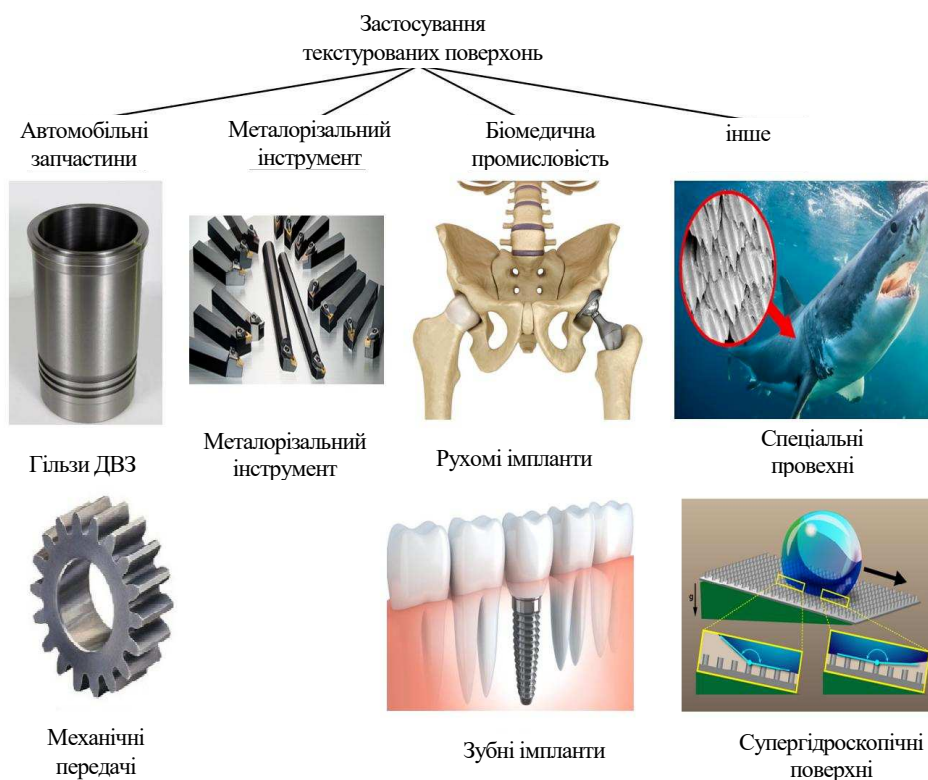


Рисунок 1.7. Сфери застосування функціональних поверхонь із регулярними мікрорельєфами [52]

Формування на робочих поверхнях деталей машин регулярних мікрорельєфів значно покращує їх експлуатаційні властивості [60] (рис.1.8).

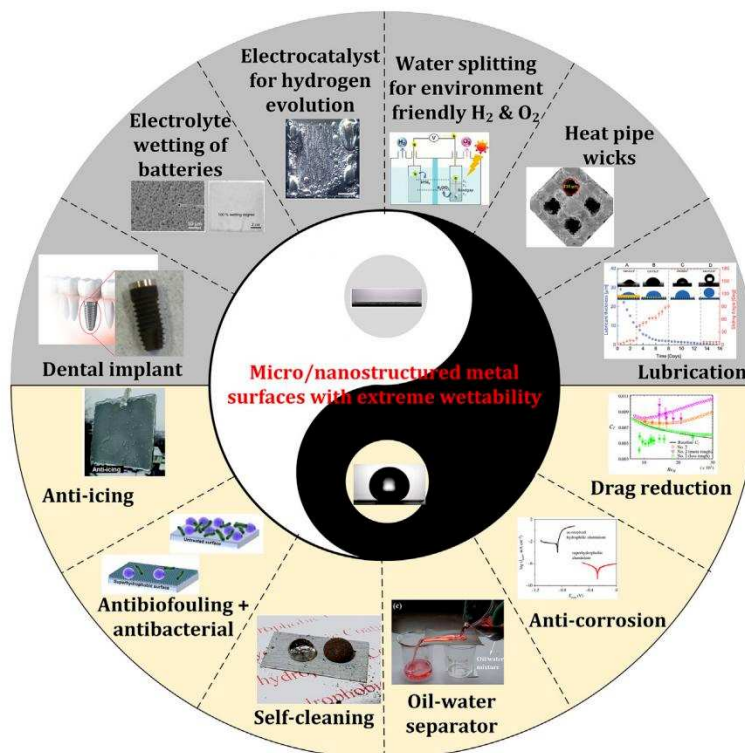


Рисунок 1.8. Властивості поверхонь із регулярними мікрорельєфами [60]

Так регуляризація мікрорельєфу поверхні дозволяє надати їй наступних властивостей: здатності утримувати більшу кількість рідини; збільшує корозійну стійкість; збільшує здатність поверхні до самоочищення; зменшення коефіцієнта тертя; надає поверхні антибактеріальні та протиобледеніні властивості; покращує процес гідролізу води при використанні в якості катодів.

Згідно з [27] до регулярного мікрорельєфу II типу відносять мікрорельєф із системою канавок, які дотикаються. У випадку частково регулярного мікрорельєфу такі канавки можна поділити на три підвиди: канавки радіальна вісь яких співпадає, вісь яких зміщена на 0,5 кутового кроку та вісь яких зміщена на іншу величину.

Встановлення основних закономірностей впливу рельєфних утворень на механізми тертя та зношування та оптимізація технології формування регулярного рельєфу поверхонь тертя активно досліджуються за

детермінованими та стохастичними підходами, а також прямими фізичними експериментами [50, 55].

Дослідженням регулярних та частково регулярних мікрорельєфів в Україні займається наукова школа очолювана д.т.н., професором Киричком П.О., до складу якої входять Зигуля С. М., Лотоцька О.І., Хмілярчук О. І. та інші. Їх дослідження спрямовані на підвищення ресурсу деталей поліграфічного обладнання шляхом створення на їх поверхні регулярних та частково регулярних мікрорельєфів із заданими геометричними параметрами [1, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 108, 109, 110, 117]. Також представниками цієї наукової школи розроблена комплексна оздоблювально-змінююча технологія оброблення циліндричних поверхонь та інструменти для її забезпечення. Крім цього розроблено програмне забезпечення для керування технологічними процесами формування РМР та ЧРМР.

Дослідження Дзюри В.О. та Марущака П.О. присвячені створенню нових типів регулярних мікрорельєфів, зокрема частково регулярних мікрорельєфів, що формуються на торцевих поверхнях тіл обертання [12, 13, 16, 18, 21, 17, 85], частково регулярних мікрорельєфів ротаційного виду [22]. Також ними досліджувались параметри шорсткості поверхонь з регулярними мікрорельєфами та оптимальні режими оброблення при яких забезпечується максимальна маслоємність поверхні [14, 15, 86, 89]а також причини виходу з ладу деталей автомобілів та технологічні методи їх усунення [19, 24].

В роботах Кусого Я.М. розроблено науково-прикладні основи аналізу процесів технологічного успадковування параметрів виробів за гомогенністю (однорідністю) їхнього матеріалу під час проектування оптимальної структури технологічних процесів виготовлення деталей машин для підвищення експлуатаційних характеристик і показників надійності [102, 103, 104, 105, 106, 107].

За кордоном створенням нових типів мікрорельєфів та дослідженням їх властивостей присвячені наукові роботи вчених з багатьох країн світу. Серед них команда болгарських вчених у складі Славова С. (Slavov S.) та ДіміТРова Д.

(Dimitrov D.) [64, 65, 69, 66, 70, 68, 9]. Роботи цих вчених присвячені моделюванню параметрів регулярних мікрорельєфів та їх формуванні на поверхнях складної форми. Ними розроблено універсальний інструмент, що дозволяє формувати канавки із різним зусиллям деформування, що особливо актуально при формуванні мікрорельєфів на матеріалах, що володіють різними фізико-механічними властивостями. Значна кількість експериментальних досліджень цієї роботи була проведена на обладнанні, що заходить в лабораторіях цих вчених.

Роботи польського вченого Паулюса П. (Pawlus P.) [55, 54, 72, 52, 56, 76] присвячені дослідженню основних закономірностей впливу рельєфних утворень на механізми тертя та зношування та оптимізація технології формування регулярного рельєфу поверхонь тертя.

Зокрема в роботі [4] відзначено, що нанесення регулярного мікрорельєфу на внутрішню циліндричну поверхню плунжерної пари штангового насоса значно збільшує герметичність рухомого з'єднання і, як наслідок, ресурс його роботи. Підтвердженням цього є дослідження наведені в роботі [59, 47]. Авторами встановлено, що формування регулярних мікрорельєфів з різними геометричними параметрами можна керувати режимами тертя та змащування спряжених поверхонь тертя і, таким чином, запобігати недопустимим режимам, при яких поверхня буде пошкоджена. Процес керування режимами тертя є важливим в робочих поверхнях авіаційного обладнання. Застосування поверхонь з регулярним мікрорельєфом перспективне для високоточних вузлів та агрегатів із спряженими рухомими деталями - заслінок клапанів масляних та гідравлічних систем, торців шестерень насосів, елементами двигунів внутрішнього згорання та інших машин, що забезпечує високий термін служби.

В роботі [77] наведено результати досліджень впливу різних форм канавок регулярного мікрорельєфу, що був сформований на поверхнях дослідного зразка на коефіцієнт тертя, температуру в зоні тертя, властивість поверхні відводити продукти зношування. Зменшення коефіцієнта тертя призводить до зменшення споживання енергетичних ресурсів, які витрачається для приведення механізмів

в рух, що може бути дуже актуальним як у авіаційній промисловості та і в будь-якій іншій галузі транспорту.

В роботі [81] наведено результати досліджень, які вказують на те, що формування мікроструктури у вигляді впорядкованого мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні гільзи циліндра сприяє здатності цієї поверхні утримувати масляну плівку. Така властивість робочої поверхні гільзи гідроциліндра покращує експлуатаційні властивості поверхні і збільшує ресурс гідроциліндра в цілому.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень [75] переходу триб систем із умов нормального до «аномально низького» тертя з позиції термодинаміки. Причиною такого переходу є формування на поверхні контакту мікрорельєфу з певними параметрами, який створює умови для мікро контактної квазіпружної взаємодії.

Покращення антикорозійних властивостей поверхні із магнієвого сплаву (Mg Alloy AZ31) після оброблення поверхні пластичним деформуванням у спосіб близький до віброобкатування кулькою описано в роботі [7]. Автором проведені експериментальні дослідження по методу Taguchi для підтвердження ефективності процесу оброблення поверхні обкатуванням кулькою та покращення корозійної стійкості матеріалу.

Проведено експериментальне дослідження впливу режимів віброобкочування на основні розмірні характеристики канавок [49]. В якості вхідних факторів процесу використовувались: діаметр кульки, сила і швидкість обертання заготовки. Були виміряні глибина і ширина канавок, утворених рухомими кульками на поверхневому шарі заготовки. Шляхом математичної обробки експериментальних результатів виведені емпіричні математичні залежності. Ці залежності підкреслюють інтенсивність впливу вхідних факторів процесу віброобкочування на геометричні параметри канавки. Однак в даному дослідженні не встановлено впливу швидкості подачі як параметра режиму оброблення на геометричні параметри канавки. Також результати

експериментальних досліджень процесу формування регулярних мікрорельєфів з наступним хромуванням плоскої поверхні [66]

В сучасному машинобудівному виробництві для формування регулярних мікрорельєфів все частіше використовують фрезерні верстати з ЧПК. В роботі [71] авторами запропонована технологія нанесення регулярного мікрорельєфу на плоскій поверхні за допомогою фрезерного верстату з ЧПК. Представлено рівняння залежності для руху центра інструменту в залежності від вхідних параметрів. Описана методика створення керуючої програми для систем чисельного програмного управління Siemens і Fanuc з нанесення регулярного мікрорельєфу пластичним деформуванням на плоскі поверхні. Для візуалізації розробленого мікрорельєфу використаний симулятор WinNC, розроблений ЕМСО (Австрія).

Характерно, що швидкість деформування в досить широких межах чинить значний вплив на якість поверхневого шару [62]. Із зростанням швидкості деформування збільшується величина пластичної деформації та зменшується шорсткість обробленої поверхні. Однак ця залежність носить екстремальний характер. Саме пошук цього значення є задачею сучасних досліджень в цій галузі. Це слід розглядати як можливість підвищення продуктивності обробки. Визначення функціонального зв'язку між силою, яка додається до інструменту і параметрами якості деталей, є однією з основних задач досліджень в галузі обробки ППД.

Класифікація актуальних напрямів наукових досліджень, що мають відношення до формування регулярних мікрорельєфів на робочих поверхнях деталей машин наведено в роботі [58] (рис. 1.9).

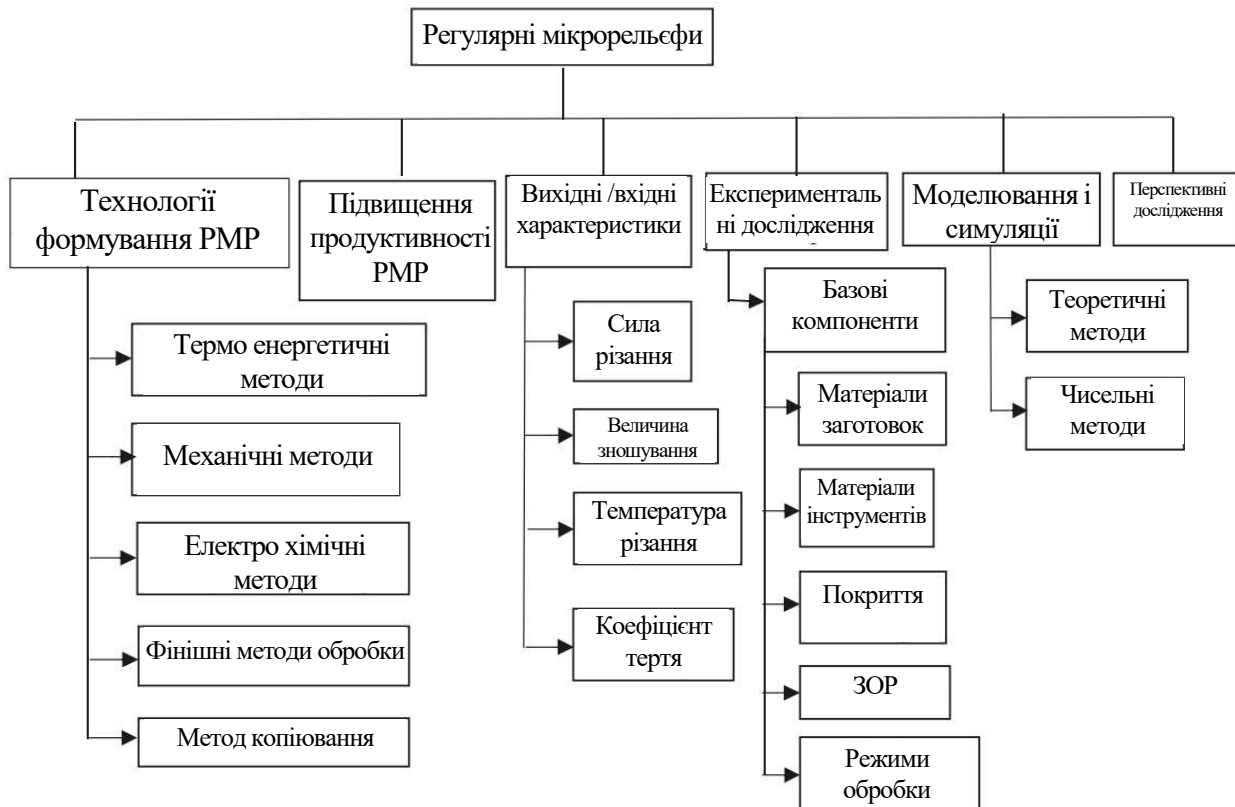
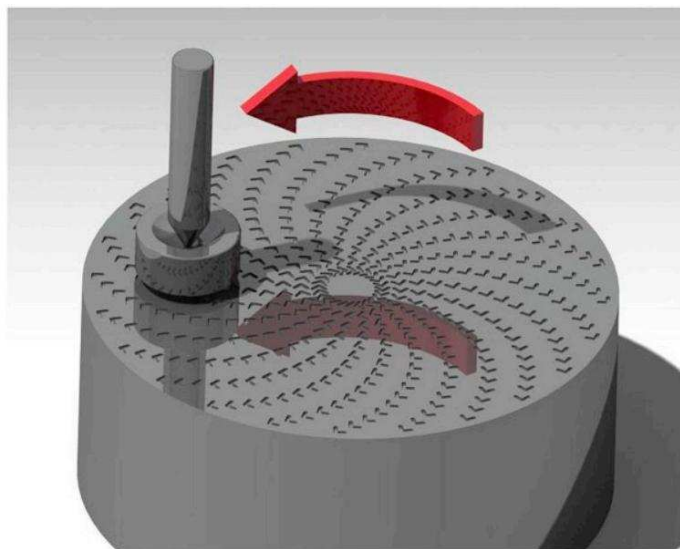


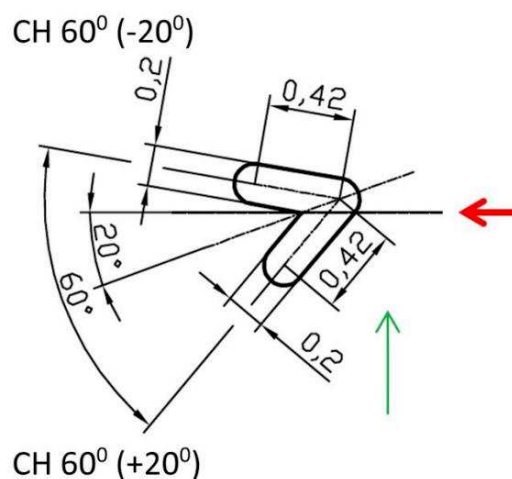
Рисунок 1.9. Класифікація напрямів наукових досліджень в галузі формування регулярних мікрорельєфів [58]

Для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей робочих поверхонь формують мікрорельєфи із різноманітними за формою та розмірами канавок. Наприклад в роботі [76] авторами було проведено порівняльні дослідження експлуатаційних властивостей плоских обертових поверхонь (рис. 1.10) із канавками дискретної форми.

На цих поверхнях було сформовано регулярні мікрорельєфи, елементами яких в першому випадку були періодично повторювані сферичні лунки, а в іншому сліди відрізків різної довжини (шеврони), що перетинаються під гострими кутами в діапазоні $60^{\circ} - 90^{\circ}$. Результатом дослідження було визначення коефіцієнт тертя поверхонь із сформованими мікрорельєфами та пошук оптимальної форми, розмірів та взаємного розташування елементів такого мікрорельєфу.



а



б

Рисунок 1.10. Схема формування та параметри канавок регулярного мікрорельєфу сформованого на торцевій поверхні тіла обертання [76]

Схожі за об'єктом дослідження були проведені в роботі [79]. Авторами досліджені поверхневі структури глибиною 8 нм, сліди яких у вертикальній площині будуть у вигляді кола, еліпса та трикутника. Досліджувався вплив форми елементів мікрорельєфу на коефіцієнт тертя. Також встановлено, що за умови однакової площі і глибини лунки еліпсної та трикутної форми мають меншу несучу здатність порівняно з лункою круглої форми.

Поверхневі мікроструктури у вигляді квадратних лунок та канавок досліджені у роботі [57]. Площа покриття поверхні елементами мікрорельєфу становила 25%. Після формування на поверхні дослідних зразків текстури у вигляді канавок та квадратних лунок глибиною 20 нм їх піддавали дії тертя із аналогічною поверхнею, імітуючи процес зношування. Кожен зразок здійснював відносні переміщення в кількості 20 тис. циклів. Після імітації процесу зношування зразки порівнювали із контрольним зразком із плоскою поверхнею без сформованого мікрорельєфу. Результатом дослідження є висновок про те, що поверхні із сформованими поверхневими мікроструктурами володіють кращими експлуатаційними властивостями. Поверхневі експлуатаційні дефекти за період

проведення досліджень спостерігались лише на поверхні без сформованих мікрорельєфів.

У роботі [2] авторами запропоновано підхід, при якому регулярний мікрорельєф розглянуто з позиції факторів, що визначають його характеристики, зокрема: розміру та форми та взаємного розміщення елементів мікрорельєфу; орієнтації елементів мікрорельєфу відносно поверхні на якій він сформований; співвідношення між параметрами мікрорельєфу; ієрархічного ранжування. Наведено приклади регулярних мікрорельєфів у вигляді впорядкованих мікроструктур у навколишньому середовищі, наведено розміри їх складових елементів та показано їх орієнтацію. Розглянуто фактори, що впливають на функціональні властивості поверхонь із регулярними поверхневими структурами (рис. 1.11).



Рисунок 1.11. Параметри, що впливають на структурованість поверхні [2]

Мікроструктура поверхні у вигляді прямолінійних канавок була досліджена в роботі [40]. Ці мікроструктури глибиною 80-120 нм у куті канавок 0° , 45° , 90° були створені лазерним променем. Авторами досліджувались фрикційні властивості цих поверхонь. Дослідження проводились при накладанні навантаження, що притискає кульку до дослідного зразка із зусиллям від 20 до

100 Н та здійснює відносні циклічні рухи в кількості 10 тис. циклів, імітуючи зношування.

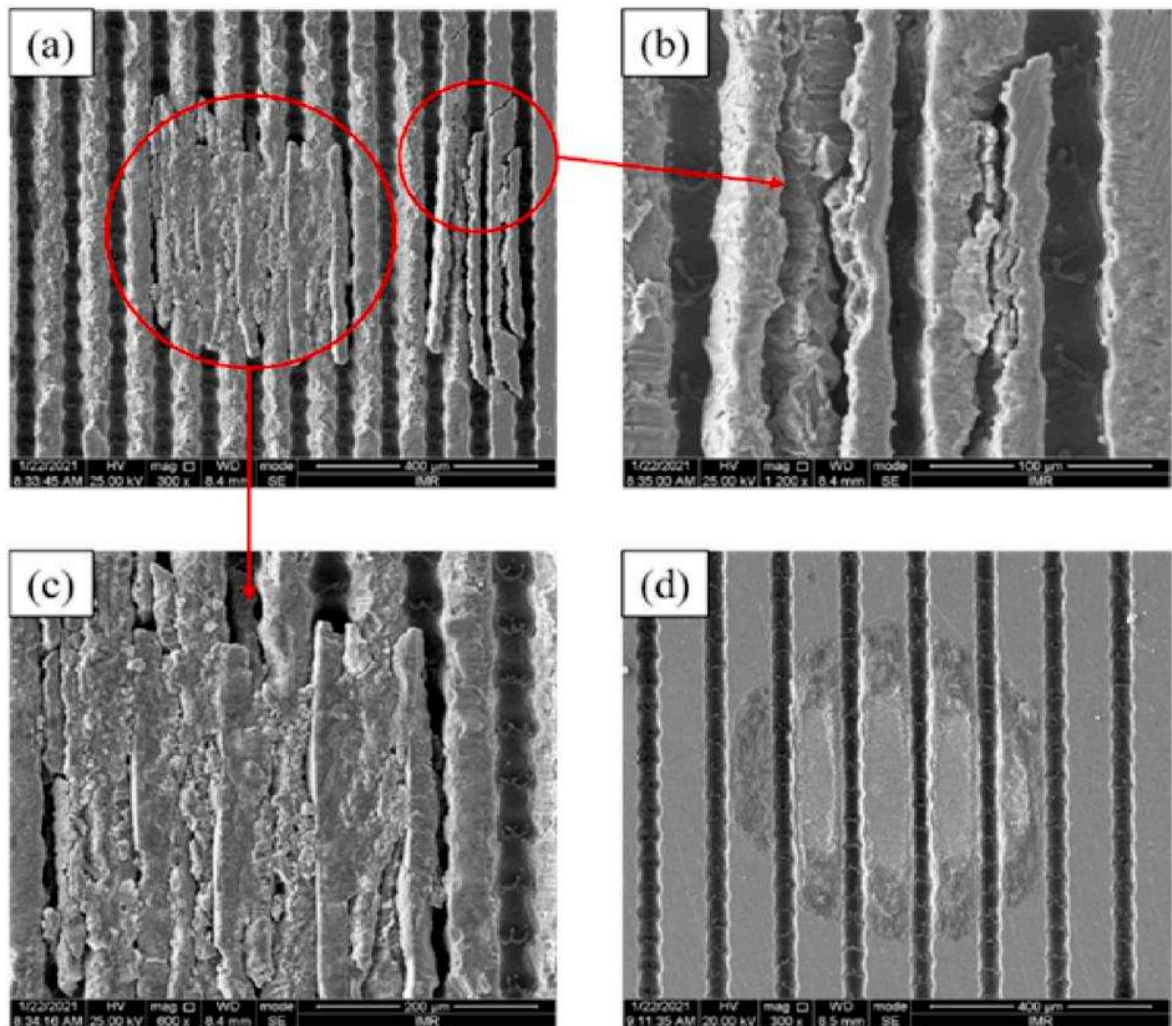


Рисунок 1.12. Стан канавок мікрорельєфу глибиною 80-120 нм після імітації експлуатації шляхом зворотно-поступального руху з металевою кулькою в кількості 10 тис. циклів [40]

Отримані результати зміни коефіцієнта тертя порівнювали із контрольним зразком із поверхнею без створених поверхневих мікроструктур. Також в роботі встановлено механізм заповнення канавок продуктами взаємодії поверхонь та здійснено пошук оптимального розміщення канавок для їх виведення із зони контакту спряжених поверхонь.

Дослідження, що підтверджують здатність текстурованих поверхонь (рис. 1.13) краще утримувати рідини наведено в роботі [82]. Авторами проведено дослідження швидкості скочування краплин рідини із поверхонь із різними

мікрорельєфами. Було виготовлено дослідні зразки із дев'ятьма типами регулярних мікрорельєфів різної форми.

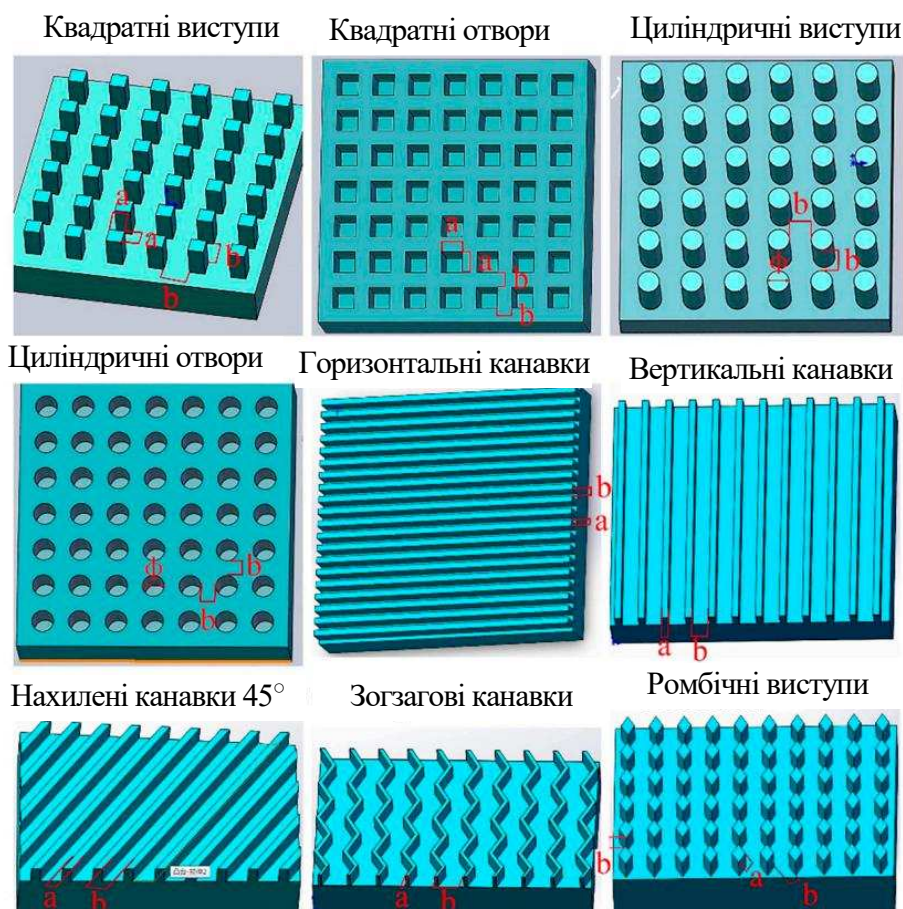


Рисунок 1.13. Досліджувані форми канавок, що забезпечують найкращі гігроскопічні властивості [82]

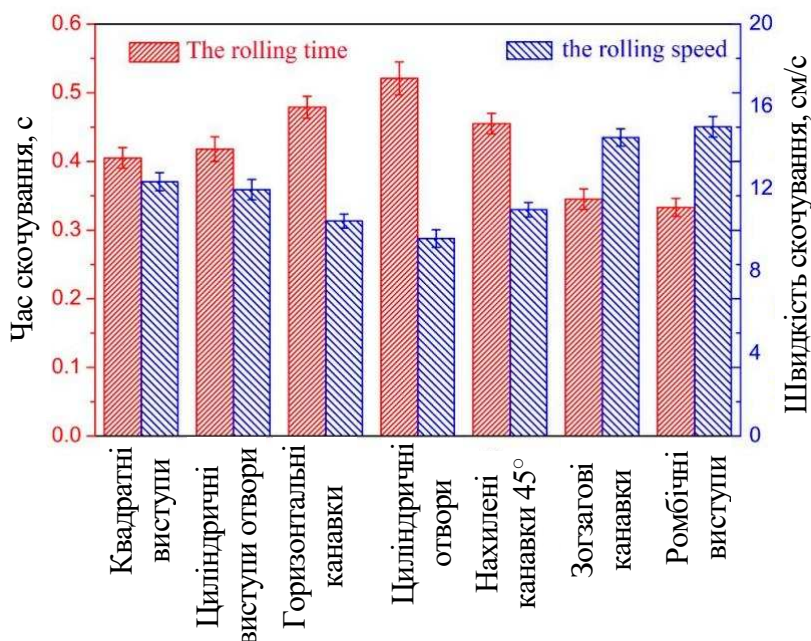


Рисунок 1.14. Результати дослідження часу та швидкості сходження краплини рідини на різних типах поверхонь із регулярним мікрорельєфом [82]

Встановлено, що поверхні із сформованими мікрорельєфами, зокрема повздовжніми канавками довше утримують краплі рідни ніж плоскі поверхні та поверхні із іншими типами мікрорельєфів.

Пошукові дослідження в напрямку визначення оптимальної геометрії канавок мікрорельєфу наведені в роботі [80].

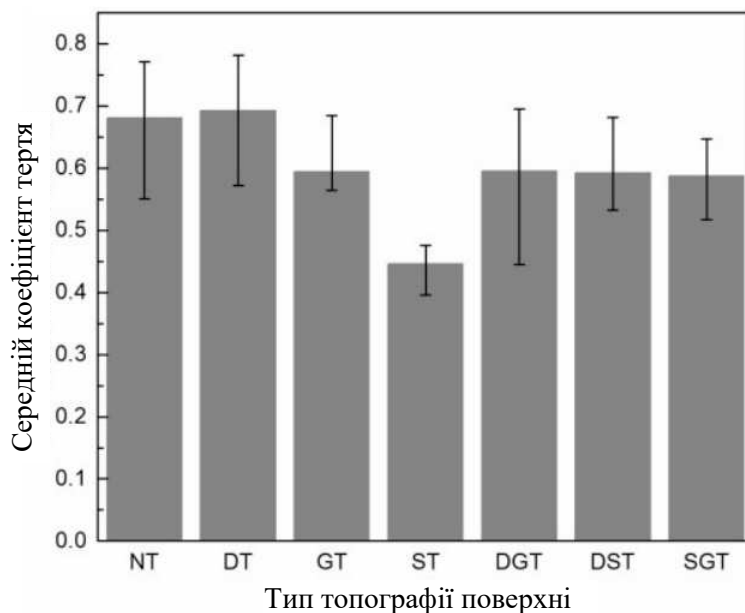
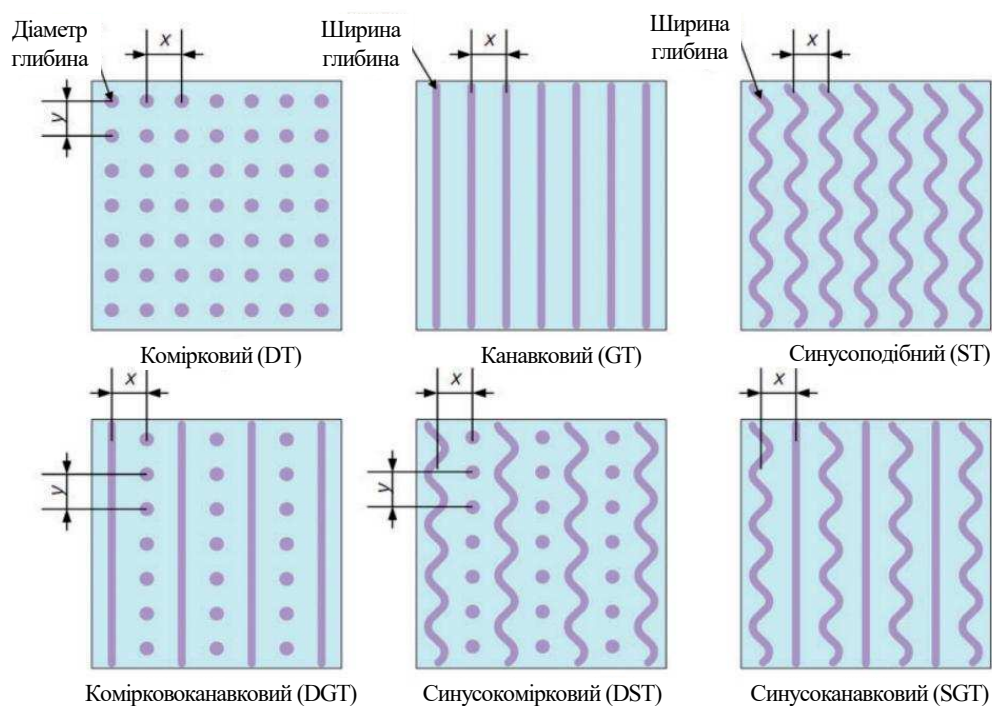


Рисунок 1.15. Середній коефіцієнт тертя нетекстурованих і текстурованих поверхонь: NT: нетекстурована; DT: з ямковою текстурою; GT: з канавковою текстурою; ST: з синусоїдальною текстурою; DGT: з ямково-канавковою

текстурою; DST: з ямково-синусоїдальною текстурою; SGT: з синусоїдально-канавковою текстурою [80]

Як видно з рис. 1.15 канавки синусоподібної форми (ST) забезпечують найменше значення коефіцієнта тертя між поверхнями із сформованим мікрорельєфом. Це пояснюється двома факторами, зокрема: синусоподібна форма канавки володіє найбільшою довжиною. При однакових розмірах дослідного зразка така канавки при інших однакових геометричних параметрах (ширина канавки, амплітуда) займатиме найбільшу площу і відповідно реальна площа контакту двох спряжених тіл буде меншою, що спричинятиме зменшення коефіцієнта тертя. Ще одним фактом, що пояснює зменшення коефіцієнта тертя є те, що канавка такою форми маю кращу здатність до накопичення та утримання мастила, що зменшує коефіцієнт тертя спряжених поверхонь.

Таким чином достатньо багато фактів, що наведені у наукових публікаціях як вітчизняних так і закордонних дослідників потребують уточнення, що і планується виконати в межах цієї дисертаційної роботи.

1.4 Висновки та постановка завдань досліджень

Провівши ретельний аналіз причин утворення експлуатаційних дефектів робочих поверхонь деталей машин, а також технологічних схем та процесів їх оброблення встановлено наступне:

Існуючі технологічні процеси в більшості зорієнтовані на забезпечення заданих (геометричних та фізико-механічних) параметрів якості поверхні, які іноді не забезпечують необхідних експлуатаційних властивостей. В багатьох виробництвах все ще намагаються максимально зменшити шорсткість поверхні не зважаючи на такий параметр як маслоємність поверхні, яка іноді набуває критично малих значень для контактних поверхонь пари тертя. При цьому умови експлуатації поверхонь іноді враховуються не в повному обсязі..

Для вирішення описаного технічного протиріччя в роботі поставлені наступні завдання:

- визначити закономірності формування регулярних мікрорельєфів різних типів в залежності від заданих геометричних параметрів та режимів формування;

- дослідити вплив типу мікрорельєфів та технологічних режимів його формування на геометричні параметри шорсткості поверхні та визначити діапазони режимів, що забезпечують мінімальну шорсткість поверхні;

- дослідити вплив типу мікрорельєфів та технологічних режимів його формування на маслоємність поверхонь як одного з основних експлуатаційних параметрів, що визначає умови роботи пари тертя через побудову діаграм зношування (кривих Аббота-Фаєрстоуна). При цьому визначити діапазони режимів, що забезпечують максимальну маслоємність поверхонь;

- визначити вплив типу мікрорельєфу та режимів його формування на фізико-механічні параметри якості поверхні, зокрема її мікротвердість в околі канавки.

Розділ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ, СФОРМОВАНИХ НА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНЯХ

2.1 Структура та алгоритм проведення дослідження

Для досягнення поставлених в роботі завдань було вирішено створити алгоритм проведення дослідження (рис. 2.1). Основною метою проведення дослідження є пошук таких геометричних параметрів поверхонь з регулярними мікрорельєфами та відповідних режимів їх формування при яких забезпечувалась б найкращі експлуатаційні властивості поверхні, зокрема максимальна маслоємність та відносна опорна довжина профілю поверхні.

Експлуатаційні властивості поверхні визначаються відносною площею мікрорельєфу – параметром, що визначається як відношення площі проекції канавок мікрорельєфу до площі поверхні на якій він сформований.

Відносна опорна довжина профілю поверхні є стандартизованим параметром [38, 39, 92]. Маслоємність поверхні визначали у відповідності до ISO 21920-2.

Оскільки попередніми дослідженнями [21] було становлено, що геометричні параметри канавок мікрорельєфів практично не впливають на експлуатаційні властивості поверхні, а найбільший вплив на ці властивості здійснює тип мікрорельєфу, то саме цей параметр було обрано для подальшого дослідження. Для дослідження було обрано частково регулярні мікрорельєфи основних типів (I, II, III згідно [71]). Серед технологічних параметрів найбільший вплив на параметри шорсткості поверхні чинить подача інструменту [21] під час формування регулярних мікрорельєфів чинить найбільший вплив на параметри шорсткості поверхні. Тому саме подачу обрано для подальшого дослідження впливу на параметри шорсткості та маслоємність поверхні.



Рисунок 2.1. Структура проведення досліджень за темою дисертаційної роботи

Ми розглядали геометричні параметри якості, до яких відносяться параметри шорсткості поверхні та фізико-механічні до яких відноситься мікротвердість поверхні. Всі ці параметри ми будемо досліджувати в межах цієї роботи, а також визначимо при яких режимах формування та геометричних параметрах мікрорельєфу буде досягнуто максимальні параметри якості. Також ми частково дослідили вплив режимів формування та типу мікрорельєфу на експлуатаційні властивості поверхні, зокрема на маслоємність. В цій роботі ми розглядали 3 основні типи мікрорельєфів – з канавками, що не дотикаються, з канавками, що дотикаються та з канавками, що перетинаються.

2.2 Розрахунок відносної площі мікрорельєфу з канавками, що дотикаються

Основним технологічним параметром, що визначає якісні та експлуатаційні параметри оброблюваної поверхні (шорсткість, ступінь зміцнення, маслоємність, тощо) і забезпечується відповідними параметрами

віброобточування (повздовжня подача інструменту – $S_{пзодн}$; частота осциляцій – $n_{дв.х}$; амплітуда $A = 2e_{кр}$, де $e_{кр}$ – ексцентриситет привідного кулачка; діаметр кульки-обкатника – d_k ; зусилля деформування – F_d ; ширина канавки – ρ), відносна площа мікрорельєфу F_6 [71].

Під поняттям відносна площа мікрорельєфу F_6 будемо розуміти відношення (у відсотках) площі поверхні, утвореної внаслідок деформування віброобкатником обробленої поверхні при віброобточуванні до загальної площі оброблюваної поверхні.

Для визначення площі поверхні, що утворюється при використанні одного деформувального елемента тобто площі канавки F_{kl} використаємо рис 2.2.

Крива переміщення кульки-обкатника $L_{кр} = \varphi_1(\varphi_{кр})$ в залежності від часу являє собою синусоїдально-подібну криву з періодом 2π та амплітудою $A=2e_{кр}$ і описується залежністю:

$$L_{кр} = \sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун}} + e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}) - l ; \quad (2.1)$$

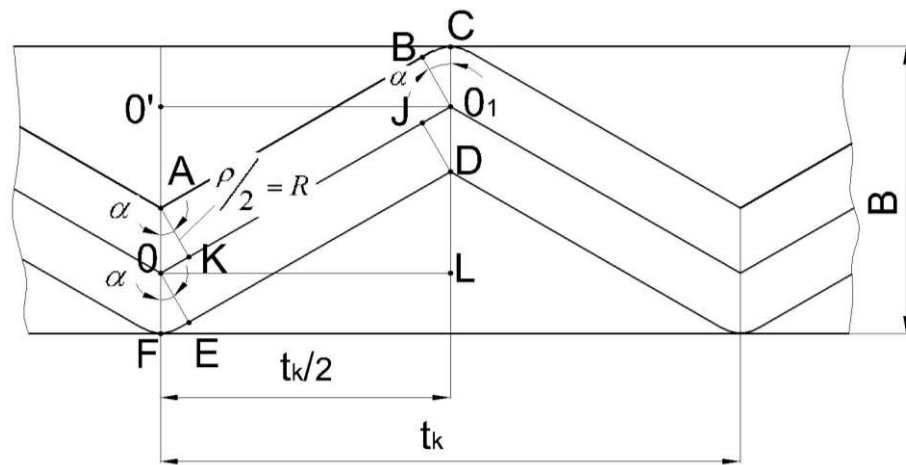


Рисунок 2.2. Розрахункова схема для визначення площі віброобточування на довжині, що дорівнює кроку t_k

Швидкість руху кульки-обкатника V_k визначається за формулою:

$$\frac{dL}{d\tau} = V_{кр} = \left((l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун})^{\frac{1}{2}} \right)' + (e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}))' - l' ; \quad (2.2)$$

Отримаємо похідну з кожного доданку окремо:

$$1). \left((l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун})^{\frac{1}{2}} \right)' = - \frac{\pi \cdot n_{ун} \cdot e_{кр}^2 \cdot \cos 2\tau\pi n_{ун}}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун}}};$$

$$2). (e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}))' = 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{ун} \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун};$$

$$3). l' = 0;$$

Отже швидкість руху кульки (деформувального елемента) V_k запишеться у вигляді:

$$\frac{dL}{d\tau} = V_{кр} = 2e_{кр} \pi n_{ун} \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун} - \frac{e_{кр}^2 \cdot n_{ун} \cdot \cos 2\tau\pi n_{ун}}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун}}}; \quad (2.3)$$

а графік залежності V_k від $\varphi_{кр}$ поданий на рис. 2.2.

З метою спрощення розрахунків замінимо синусоїдально-подібну траєкторію віброобкатника $L_{кр} = \varphi_1(\varphi_{кр})$, що описується залежністю (2.1), на прямолінійну, яка представлена формулою $L_{np} = k \cdot \varphi_{кр}$ і залежністю $L_{np} = \varphi_2(\varphi_{кр})$ (рис. 2.3).

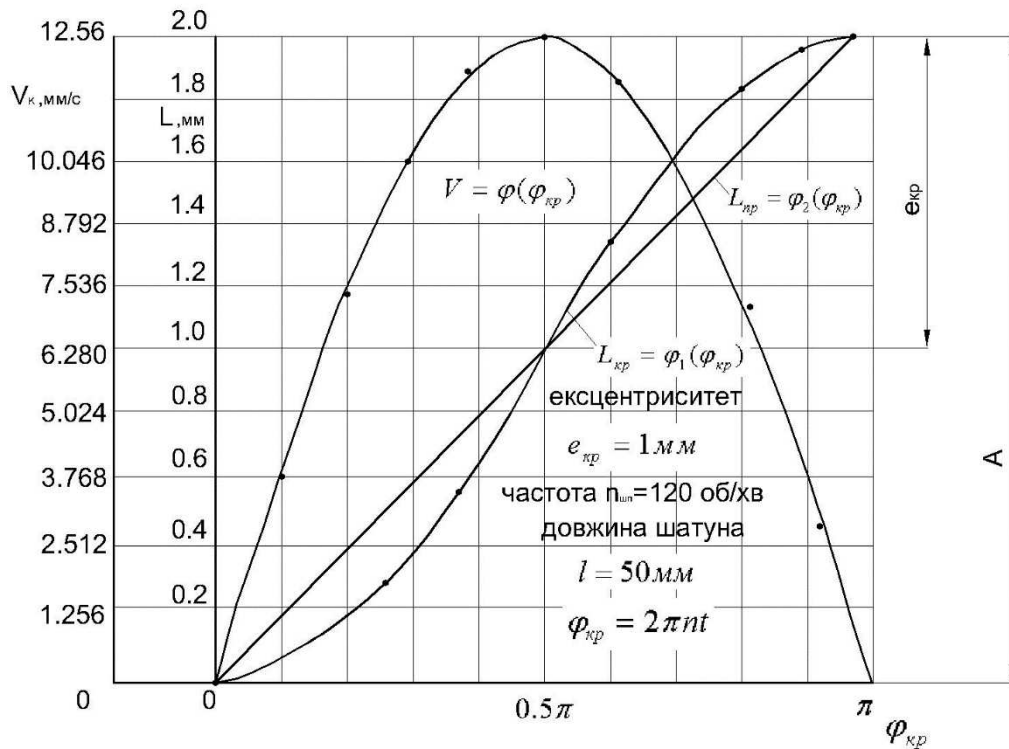


Рисунок 2.3. Графік переміщення L і швидкості V_k віброобкатника в залежності від кута $\varphi_{кр}$ повороту кривошипа l – довжина шатуна; $n_{шн}$ – частота обертання шпинделя (частота осциляцій); τ - час; $2\pi n_{шн} = \varphi_{кр}$ – кут повороту кривошипа

Така заміна повністю допустима і обґрунтовується нижчеподаним. Відносна похибка δ_F при заміні площі, утвореної кулькою-обкатником, що здійснює синусоїдально-подібну траєкторію, на площу канавки, утвореної з прямолінійною траєкторією руху обкатника, не перевищує 5%. Величину δ_F при постійній величині ρ можна визначити із залежності:

$$\delta_F = \frac{L'_{кр} - L'_{нр}}{L_{кр}} \cdot 100\% ; \quad (2.4)$$

де $L'_{кр}$ і $L'_{нр}$ - відповідно довжини кривої $L_{кр} = \varphi_1(\varphi_{кр})$ і прямої $L_{нр} = \varphi_2(\varphi_{кр})$ в інтервалі $[0, \pi/2]$. Якщо для випадку синусоїдально-подібної траєкторії швидкість руху обкатника $V_{кр}$ змінна (2.2) і рис. 2.2, то при прямолінійній траєкторії $V_{нр}$ буде постійна і визначатиметься із залежності $V_{нр} = 4e_{кр} \cdot n_{шн}$.

Шлях, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при заданих $S_{позд}$, $n_{ун}$ і $V_{np} = const$ визначиться залежністю:

$$L'_{np(\pi/2)} = \sqrt{e_{кр}^2 + \frac{0,0625S_{позд}^2}{n_{дв.х.}^2}} = \sqrt{e_{кр}^2 + 0,0625t_k^2}; \quad (2.5)$$

де t_k – крок канавки.

Шлях, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при синусоїдально-подібній траєкторії в напрямку, перпендикулярному до $S_{позд}$, визначиться із формули:

$$\begin{aligned} L_{кр1} &= \int_0^{0,25n_{ун}} 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{ун} \cdot \sin(2\pi \cdot n_{ун} \cdot \tau) d\tau - \int_0^{0,25n_{ун}} \frac{e_{кр}^2 \cdot \pi \cdot n_{ун} \cdot \cos(2\pi n_{ун} \cdot \tau)}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\pi \cdot n_{ун} \cdot \tau}} d\tau = \\ &= 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{ун} \int_0^{0,25n_{ун}} \sin(2\pi \cdot n_{ун} \cdot \tau) d\tau - e_{кр}^2 \cdot \pi \cdot n_{ун} \int_0^{0,25n_{ун}} \frac{\cos(2\pi \cdot n_{ун} \cdot \tau)}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin(2\pi \cdot n_{ун} \cdot \tau)}} d\tau \end{aligned}$$

На основі розрахункової схеми (рис. 2.3) можна стверджувати, що на довжині, яка дорівнює половині кроку канавки $t_k/2$, площа канавки, утвореної в результаті віброобкочування, буде дорівнювати подвоєній площі суми площ трапеції $OABO_1$ і сектора O_1BC .

Розглянемо площу у трапеції $OABO_1$, як суму площ трикутника OAK і прямокутника $KABO_1$.

Для знаходження відрізка OO_1 розглянемо $\triangle OO_1L$ в якому $O_1L = 2e_{кр}$, $OL = t_k/2$:

$$OO_1 = \sqrt{O_1L^2 + OL^2} = \sqrt{4 \cdot e_{кр}^2 + \frac{t_k^2}{4}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{t_k^2 + 16 \cdot e_{кр}^2}$$

Розглянемо $\triangle OAK$, його площа розраховується за формулою:

$$F_{\Delta OAK} = 1/2 \cdot AK \cdot OK, \text{ де } AK = \rho/2;$$

Оскільки $\Delta OAK \square \Delta OO_1L$, ($\angle OAK = \angle O_1OL$, $\angle OKA = \angle OLO_1 = 90^\circ$)

$$\frac{OK}{O_1L} = \frac{AK}{OK}; \quad \frac{OK}{2 \cdot e_{кр}} = \frac{\rho/2}{t_K/2};$$

звідси $OK = 2 \cdot e_{кр} \cdot \rho / t_K$;

Отже

$$F_{\Delta OAK} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{2 \cdot e_{кр} \cdot \rho}{t_K} = \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{кр}}{t_K}.$$

Оскільки подвійну площу прямокутника $KABO_1$ ($KABO_1 = EOO_1D$) можна представити як різницю площі прямокутника з одною стороною рівною відрізьку OO_1 , а другою рівною ширині канавки ($\rho = 2 \cdot AK = 2 \cdot R$) і подвоєної площі ΔOAK .

Тоді знаходимо площу прямокутника з одною стороною рівною відрізьку OO_1 , а другою рівною ширині канавки ($\rho = 2 \cdot AK = 2 \cdot R$)

$$F_{\square} = OO_1 \cdot 2 \cdot AK = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{t_K^2 + 16 \cdot e_{кр}^2};$$

Отже

$$2 \cdot F_{KABO_1} = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{t_K^2 + 16 \cdot e_{кр}^2} - 2 \cdot \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{кр}}{t_K};$$

А площа сектора круга O_1BC визначається за формулою:

$$F_{O_1BC} = \frac{\pi \cdot R^2}{360^\circ} \cdot \alpha, \text{ де } \angle \alpha = \arctg \frac{OK}{AK} = \arctg \frac{4 \cdot e_{кр}}{t_K};$$

Звідси

$$F_{\alpha, BC} = \frac{\pi \cdot R^2}{360^\circ} \cdot \alpha = \frac{\rho^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \arctg \frac{4 \cdot e_{kp}}{t_K}}{360};$$

Знаходимо площу однієї канавки на довжині $t_k/2$:

$$\frac{F_{k1}}{2} = \frac{\rho}{2} \sqrt{t_K^2 + 16e_{kp}^2} - 2 \cdot \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{kp}}{t_K} + 2 \cdot \frac{\rho^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{kp}}{t_K}}{360} = \frac{\rho}{2} \sqrt{t_K^2 + 16e_{kp}^2} + \frac{\rho^2}{4} \left(\frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{kp}}{t_K}}{180} - \frac{4e_{kp}}{t_K} \right)$$

Після спрощення із врахуванням того, що крок канавки $t_k = S_{nzd} / n_{об.х.}$, площа однієї канавки на довжині кроку виразиться залежністю:

$$F_{k1} = \rho \sqrt{t_K^2 + 16e_{kp}^2} + \frac{\rho^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{kp}}{t_K}}{180} - \frac{4e_{kp}}{t_K} \right). \quad (2.6)$$

Кут нахилу осі канавки до лінії, паралельної до напрямку поздовжньої подачі (кут сітки [71]) визначається за формулою:

$$\alpha = \arctg \frac{4e_{kp} \cdot n_{об.х.}}{S_{nzd}} \quad (2.7)$$

При проектуванні віброголовок кількість віброобкатників для утворення мікрорельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (рис. 2.4), можна визначити із залежності:

$$i_0 = \frac{H_{\text{вт}} - 2 \cdot e_{\text{кр}} - \rho + \left[\rho / \cos \left(\arctg \frac{4e_{\text{кр}}}{t_{\text{к}}} \right) \right]}{\rho / \cos \left(\arctg \frac{4e_{\text{кр}}}{t_{\text{к}}} \right)} = \frac{H_{\text{вт}} + \rho \left[\sqrt{1 + \left(\frac{4e_{\text{кр}} n_{\text{дв.х.}}}{S_{\text{нзб}}} \right)^2} - 1 \right] - 2e_{\text{кр}}}{\rho \sqrt{1 + \left(\frac{4e_{\text{кр}} n_{\text{дв.х.}}}{S_{\text{нзб}}} \right)^2}} \quad (2.8)$$

При заданих значеннях $H_{\text{вт}}$ і попередньо визначених i_0 для отримання рельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (рис. 2.7), повинна виконуватись необхідна умова:

$$\rho = \frac{H_{\text{вт}} - 2e_{\text{кр}}}{1 + (i_0 - 1) \sqrt{1 + \frac{16e_{\text{кр}}^2}{t_{\text{к}}^2}}}; \quad (2.9)$$

де i_0 – кількість деформувальних елементів.

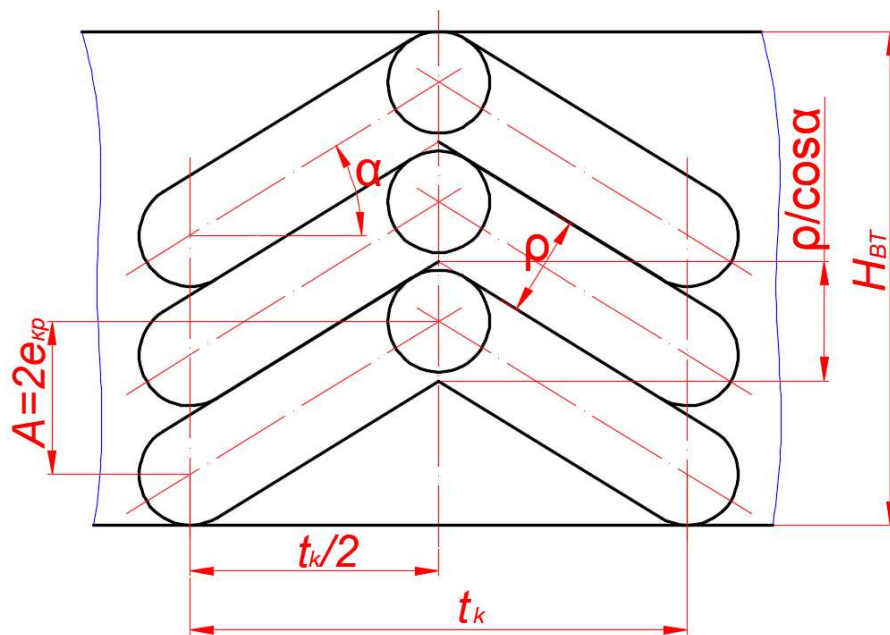


Рисунок 2.4. Розрахункова схема для визначення ширини віброобкоченої канавки ρ

Із рівняння (2.7) випливає, що при заданих $H_{\text{вт}}$, t та i_0 рельєф (рис. 2.4) може бути отриманий тільки при певних значеннях $e_{\text{кр}}$ і ρ .

Розрахунок відносної площі поверхні з регулярним мікрорельєфом для II виду регулярного мікрорельєфу.

Відносна площа мікрорельєфу для рельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (II вид мікрорельєфу), може бути визначена при використанні формули (2.8), підставивши у ній замість величини i_0 величину $i_1 = i_0 - n_0$, де $n_0 < i_0$ та $n_0 = 1, 2, 3, \dots, i_0 - 1$.

$$F_e = 100 \frac{\left(i_1 \cdot \left[\rho \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{позд}}^2}{n_{\text{дов.х.}}^2} + 16e_{\text{кр}}^2} + \frac{\rho^2}{2} \left(\frac{\pi \arctg \frac{4e_{\text{кр}} n_{\text{дов.х.}}}{S_{\text{позд}}}}{180} - \frac{4e_{\text{кр}} n_{\text{дов.х.}}}{S_{\text{позд}}} \right) \right] \right)}{\frac{S_{\text{позд}}}{n_{\text{дов.х.}}} \left\{ \rho \left[1 + (i_1 - 1) \sqrt{1 + \left(\frac{4e_{\text{кр}} n_{\text{дов.х.}}}{S_{\text{позд}}} \right)^2} \right] + 2e_{\text{кр}} \right\}}; \quad (2.10)$$

Необхідна умова для отримання мікрорельєфу з паралельними канавками, що дотикаються, (II вид):

$$b_0 = \frac{H_{\text{вм}} + \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{\text{кр}}^2}{t^2} (1 - i_0)} - \rho - 2e_{\text{кр}}}{i_0 - 1} > 0, \quad (2.11)$$

де b_0 – відстань між паралельними канавками;

Перевірка правильності формули

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{H_{\text{вм}} + \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{\text{кр}}^2}{t^2} (1 - i_0)} - \rho - 2e_{\text{кр}}}{i_0 - 1} = \frac{H_{\text{вм}} + \frac{\rho}{\cos \alpha} (1 - i_0) - \rho - 2e_{\text{кр}}}{i_0 - 1} = \\ &= \frac{H_{\text{вм}} + \frac{\rho}{\cos \alpha} - \frac{i_0 \cdot \rho}{\cos \alpha} - \rho - 2e_{\text{кр}}}{i_0 - 1}; \end{aligned} \quad (2.12)$$

Позначимо $H_{\text{вм}} + \frac{\rho}{\cos \alpha} - \rho - 2e_{\text{кр}}$ як χ - сумарна товщина паралельних канавок, що дотикаються, на піку.

Тоді

$$\frac{\chi - \frac{i_0 \cdot \rho}{\cos \alpha}}{i_0 - 1} = \frac{\chi - i_0 \cdot \frac{\rho}{\cos \alpha}}{i_0 - 1};$$

де $\frac{\rho}{\cos \alpha}$ - ширина канавки при вершині;

$i_0 - 1$ - кількість проміжків між i_0 канавками.

Враховуючи те, що:

$$B = \frac{\rho}{\cos \alpha} + b_0; \quad \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}}} \quad (2.13)$$

Настроювальний розмір віброобкатників для формування регулярного мікрорельєфу І виду:

$$B = \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} + \frac{H_{em} + \rho \left[(1 - i_0) \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} - 1 \right] - 2e_{kp}}{i_0 - 1} \quad (2.14)$$

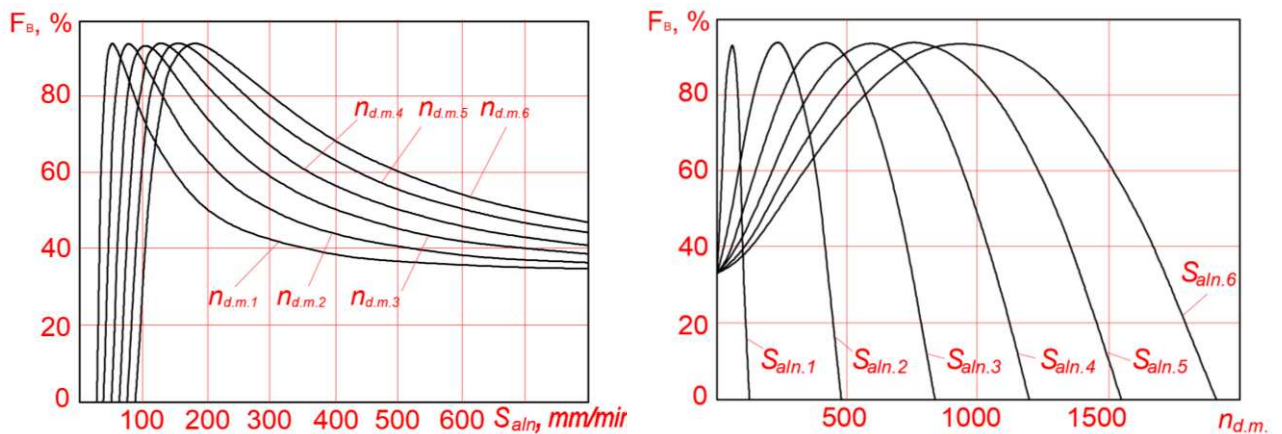


Рисунок 2.5. Графіки залежності відносної площі регулярного мікрорельєфу

F_v від:

повздовжньої подачі інструменту, S_{nz} від частоти $n_{об.х.}$ осциляцій обкатників

при заданих $n_{д.м.}$:

при заданих S_{nz} :

$$\begin{aligned}
 n_{1d.m.} &= 60 \text{ об/хв}; n_{2d.m.} = 90 \text{ об/хв}; & S_{1n3} &= 50 \text{ мм/хв}; S_{2n3} = 200 \text{ мм/хв}; S_{3n3} = 350 \\
 n_{3d.m.} &= 120 \text{ об/хв}; n_{4d.m.} = 150 \text{ об/хв}; n_5 & & \text{мм/хв}; S_{4n3} = 500 \text{ мм/хв}; S_{5n3} = 650 \text{ мм/хв}; \\
 d.m. &= 180 \text{ об/хв}; n_{6d.m.} = 210 \text{ об/хв}; & & S_{6n3} = 800 \text{ мм/хв};
 \end{aligned}$$

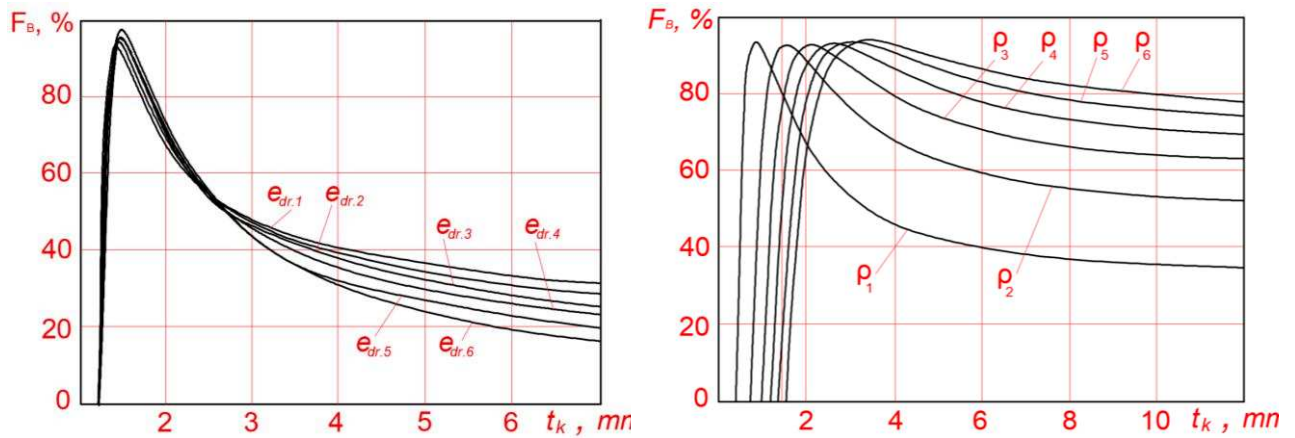


Рисунок 2.6. Графіки залежності відносної площі регулярного мікрорельєфу F_e від кроку канавки t_k

при заданих $e_{кр}$: $e_{1кр}=1$ мм; $e_{2кр}=3$ мм;
 $e_{3кр}=6$ мм; $e_{4кр}=9$ мм; $e_{5кр}=12$ мм;
 $e_{6кр}=15$ мм

при заданих ρ :
 $\rho_1=1$ мм; $\rho_2=2$ мм; $\rho_3=3$ мм; $\rho_4=4$ мм;
 $\rho_5=5$ мм; $\rho_6=6$ мм;

Отримані графічні (рис. 2.5 – 2.6) залежності показують характер залежності відносної площі віброобробчування від технологічних параметрів при різних значеннях конструктивних параметрів мікрорельєфу та технологічних параметрів процесу формування мікрорельєфу.

2.3 Визначення відносної площі регулярних та частково регулярних мікрорельєфів із різною міжосьовою відстанню канавок

Оскільки відносна площі мікрорельєфу є визначальним параметром, що визначає експлуатаційні властивості поверхні, то визначимо відносну площу регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях у відповідності до [61]. Розглянемо випадки формування мікрорельєфу з канавками, що

перетинаються та міжосьовою відстанню різної величини. Визначення відносної площі віброобробчування для мікрорельєфу з паралельними канавками, що дотикаються проведено в роботі [87].

При визначенні відносних площ для мікрорельєфів, що перетинаються (рис. 2.7) необхідно врахувати площу перекриття та відповідну кількість таких перетинів. Для цього розглянемо розрахункову схему регулярного мікрорельєфу, канавки якого розміщені. Прийняті умовні позначення A_k – амплітуда, t_k – крок канавки, b_k – ширина канавки.

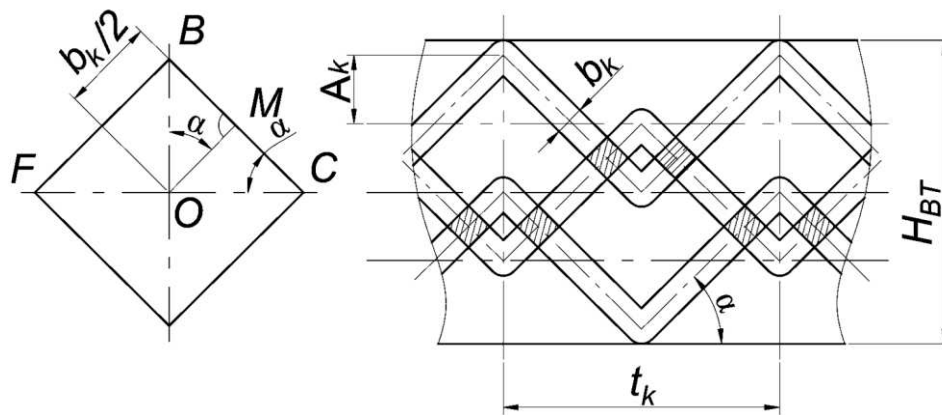


Рисунок 2.7. Розрахункова схема для визначення площі перекриття канавок мікрорельєфу

На основі розрахункової схеми, поданої на рис. 2.7, визначаємо площу перекриття $F_{пер}$:

На розрахунковій схемі розглянемо $\triangle OBM$ ($\angle OMB=90^\circ$), його сторона $MO = b_k/2$.

Звідси знаходимо сторону BM , яка дорівнює

$$BM = \frac{b_k}{2} \cdot \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right) = \frac{4 \cdot A_{kp} \cdot b_k}{2 \cdot t_k} \quad (2.15)$$

Розглянемо $\triangle OMC$ ($\angle OMC=90^\circ$), його сторона $MO = b_k/2$;

Знаходимо довжину сторони MC із залежності

$$MC = \frac{b_k}{2} \cdot ctg \alpha_k = \frac{b_k}{2 \cdot tg \left(arctg \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)} = \frac{b_k \cdot t_k}{8 \cdot A_{kp}} \quad (2.16)$$

Визначимо довжину сторони BC

$$BC = BM + MC = \frac{b_k}{2} \cdot \left(\frac{16 \cdot A_{kp}^2 + t_k^2}{4 \cdot t_k \cdot A_{kp}} \right) \quad (2.17)$$

Також цю величину можна знайти із виразу

$$BC = BM + MC = \frac{b_k}{2} \cdot tg \left(arctg \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right) + \frac{b_k}{2} \cdot ctg \left(arctg \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right) = \frac{b_k}{\sin \left(2 \cdot arctg \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)} \quad (2.18)$$

Оскільки фігура зі сторонами FB і BC – ромб, то його площа визначається із залежності

$$F_{nep} = FB \cdot BC \cdot \sin(\angle FBC) = \left(\frac{b_k}{\sin \left(2 \cdot arctg \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)} \right)^2 \cdot \sin \left(180^\circ - 2 \cdot arctg \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)$$

Після спрощення цього виразу отримаємо залежність

$$F_{nep} = \frac{b_k^2}{\sin \left(2 \cdot arctg \left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k} \right) \right)} \quad (2.19)$$

Для визначення складових формули (2.19) визначимо $\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)$.

Розглянуто ΔO_1LO у якому $\angle O_1OL=90^\circ$ (рис. 2.7) та записано вирази для визначення $\sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)\right)$ та $\cos\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)\right)$.

$$\sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)\right) = \frac{O_1L}{O_1O} = \frac{4 \cdot A_{kp}}{\sqrt{t_k^2 + 16 \cdot A_{kp}^2}}. \quad (6-2.20)$$

$$\cos\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{kp}}{t_k}\right)\right) = \frac{OL}{O_1O} = \frac{t_k}{\sqrt{t_k^2 + 16 \cdot A_{kp}^2}}. \quad (7-2.21)$$

Тоді формула для визначення однієї площі перекриття двох канавок матиме вигляд:

$$F_{nep} = \frac{b_k^2 \cdot (t_k^2 + 16 \cdot A_{kp}^2)}{8 \cdot A_{kp} \cdot t_k} \quad (2.22)$$

Кількість перекриттів для мікрорельєфу з канавками, що перетинаються, визначиться за формулою:

$$k_n = 2i_0 - 2;$$

де i_0 – кількість канавок мікрорельєфу, од.

Тоді відносна площа для III виду регулярного мікрорельєфу (з канавками, що перетинаються) визначається за формулою:

$$F_g = 100 \cdot \frac{i_0 \left(b_k \sqrt{\frac{S_{n3}^2}{n_{об.х.}^2} + 16 \cdot A_k^2} + \frac{b_k^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \arctg\left(\frac{4 \cdot A_k \cdot n_{об.х.}}{S_{n3}}\right)}{180} - \frac{4 \cdot A_k \cdot n_{об.х.}}{S_{n3}} \right) - (2 \cdot i_0 - 2) \cdot \frac{b^2 (S_{n3}^2 + 16 \cdot A_k^2 \cdot n_{об.х.}^2)}{8 \cdot A_k \cdot n_{об.х.} \cdot S_{n3}} \right)}{\frac{S_{n3}}{n_{об.х.}} \cdot (0,5(i_0 + 1)(2 \cdot A_{kp} + 0,5 \cdot b_k))} \quad (2.23)$$

Отримана залежність дозволяє оцінити вплив геометричних та технологічних параметрів процесу формування на зміну відносної площі регулярного мікрорельєфу. Для цього побудовані графіки залежності (рис. 2.8 – рис. 2.11).

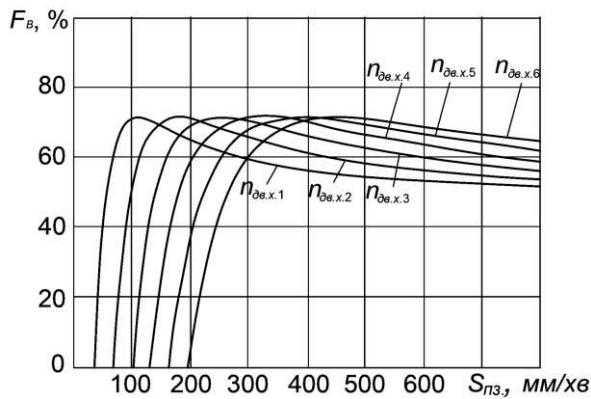


Рисунок 2.8 Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_v від повздовжньої подачі інструменту, S_{nz} при заданих $n_{ov.x}$: $n_{ov.x.1}=60$ об/хв; $n_{ov.x.2}=90$ об/хв; $n_{ov.x.3}=120$ об/хв; $n_{ov.x.4}=150$ об/хв; $n_{ov.x.5}=180$ об/хв; $n_{ov.x.6}=210$ об/хв

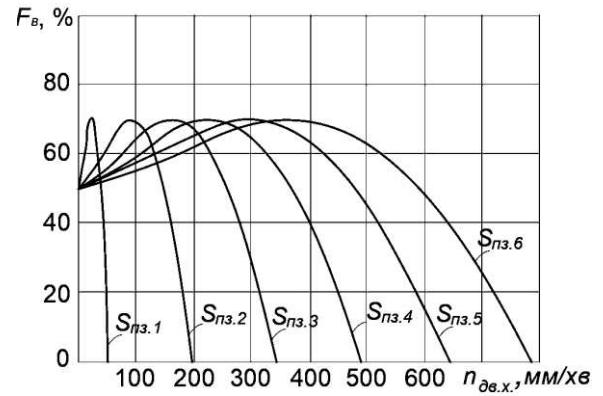


Рисунок 2.9. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_v від частоти $n_{ov.x}$ осциляцій обкатників при заданих S_{nz} : $S_{nz.1}=50$ мм/хв; $S_{nz.2}=200$ мм/хв; $S_{nz.3}=350$ мм/хв; $S_{nz.4}=500$ мм/хв; $S_{nz.5}=650$ мм/хв; $S_{nz.6}=800$ мм/хв

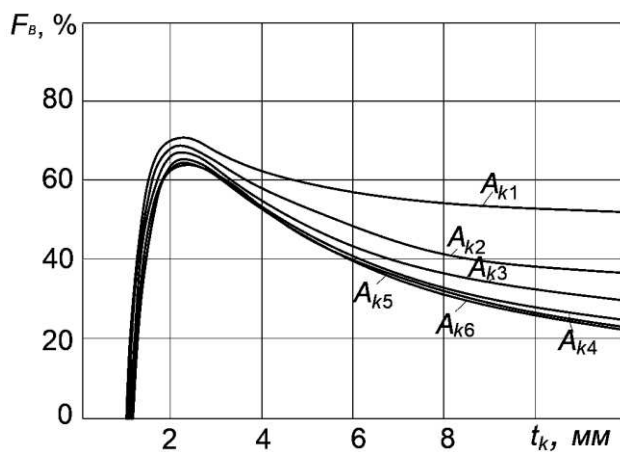


Рисунок 2.10. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_v від кроку канавки t_k при заданих A_k : $A_{k1}=1$ мм; $A_{k2}=3$ мм; $A_{k3}=6$ мм; $A_{k4}=9$ мм; $A_{k5}=12$ мм; $A_{k6}=15$ мм

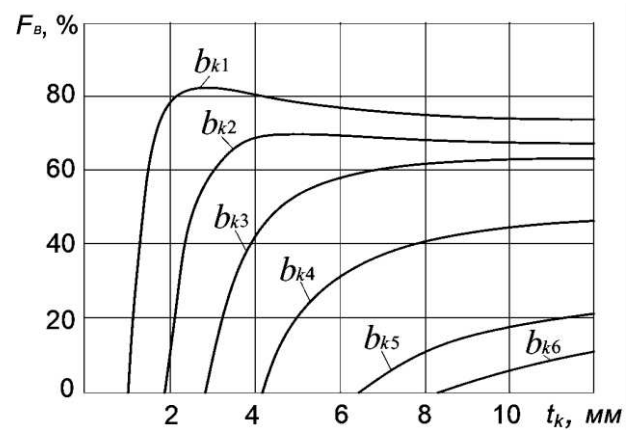


Рисунок 2.11. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_v від кроку канавки t_k при заданих b_k : $b_{k1}=1$ мм; $b_{k2}=2$ мм; $b_{k3}=3$ мм; $b_{k4}=4$ мм; $b_{k5}=5$ мм; $b_{k6}=6$ мм

Використавши формулу (2.23) проведемо аналогічний розрахунок для визначення відносної площі віброобробленої поверхні для регулярного

мікрорельєфу з канавками, що не перетинаються. Для цього будемо враховувати лише площі канавок без врахування площі їх перекриття.

Формула для визначення відносної площі мікрорельєфу матиме вигляд:

$$F_6 = 100 \cdot \frac{b_k \sqrt{\frac{S_{пз}^2}{n_{\text{дв.х.}}^2} + 16 \cdot A_k^2} + \frac{b_k^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \arctg\left(\frac{4 \cdot A_k \cdot n_{\text{дв.х.}}}{S_{пз}}\right)}{180} - \frac{4 \cdot A_k \cdot n_{\text{дв.х.}}}{S_{пз}} \right)}{S_{пз} \cdot (2 \cdot A_{кр} + b_k) \cdot n_{\text{дв.х.}}} \quad (2.24)$$

Отримана залежність дозволяє оцінити вплив геометричних та технологічних параметрів процесу формування на зміну відносної площі регулярного мікрорельєфу. Для цього побудовані графіки залежності (рис. 2.12 – рис. 2.15).

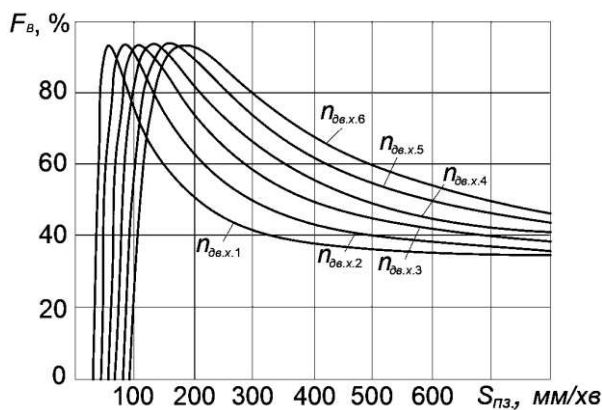


Рисунок 2.12. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_6 від повздовжньої подачі інструменту $S_{пз}$ при заданих $n_{\text{дв.х.}}$:
 $n_{\text{дв.х.}1}=60$ об/хв; $n_{\text{дв.х.}2}=90$ об/хв;
 $n_{\text{дв.х.}3}=120$ об/хв; $n_{\text{дв.х.}4}=150$ об/хв;
 $n_{\text{дв.х.}5}=180$ об/хв; $n_{\text{дв.х.}6}=210$ об/хв

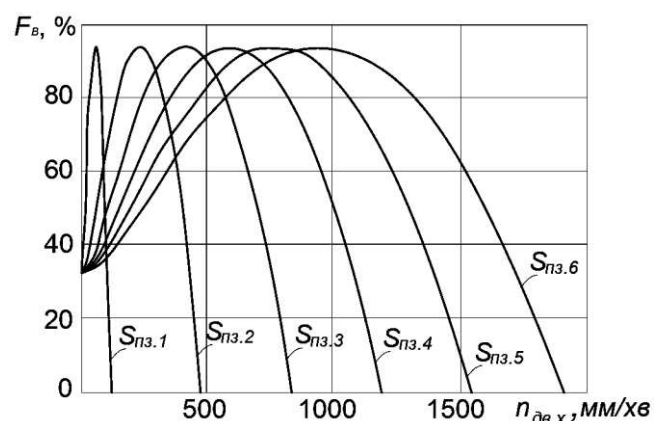


Рисунок 2.13. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_6 від частоти $n_{\text{дв.х.}}$ осциляцій обкатників при заданих $S_{пз}$: $S_{пз1} = 50$ мм/хв; $S_{пз2} = 200$ мм/хв; $S_{пз3} = 350$ мм/хв; $S_{пз4} = 500$ мм/хв; $S_{пз5} = 650$ мм/хв; $S_{пз6} = 800$ мм/хв

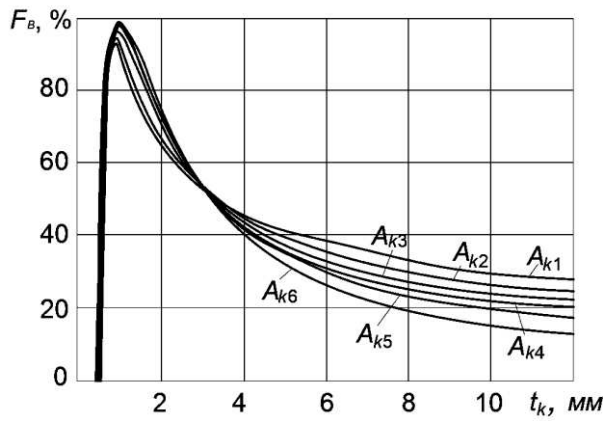


Рисунок 2.14. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_b від кроку канавки t_k при заданих A_k : $A_{k1} = 1$ мм; $A_{k2} = 3$ мм; $A_{k3} = 6$ мм; $A_{k4} = 9$ мм; $A_{k5} = 12$ мм; $A_{k6} = 15$ мм

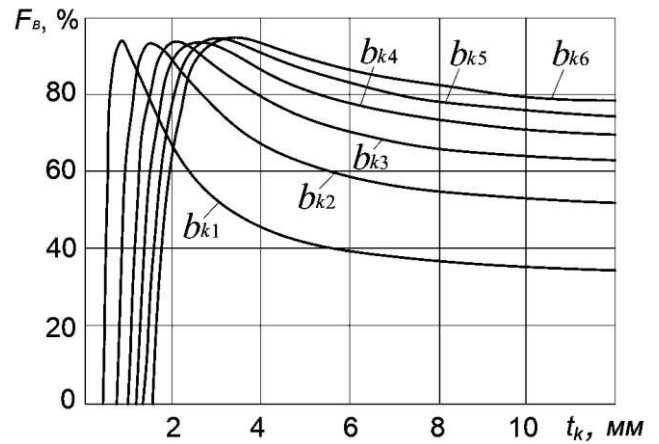


Рисунок 2.15. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_b від кроку канавки t_k при заданих b_k : $b_{k1} = 1$ мм; $b_{k2} = 2$ мм; $b_{k3} = 3$ мм; $b_{k4} = 4$ мм; $b_{k5} = 5$ мм; $b_{k6} = 6$ мм

Проведено розрахунок відносної площі мікрорельєфу для повністю регулярного мікрорельєфу (IV вид ЧРМР).

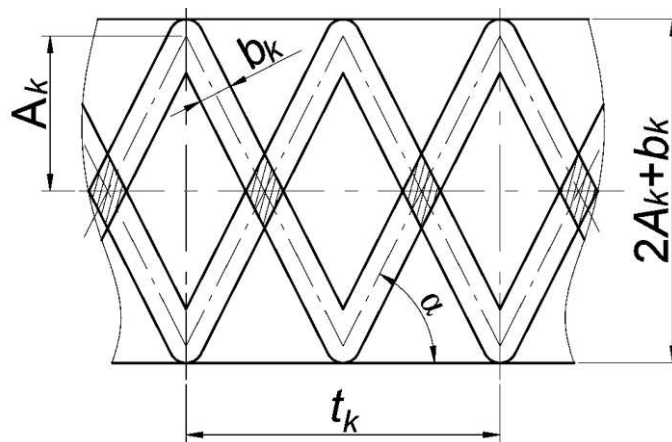


Рисунок 2.16. Розрахункова схема для визначення площі та кількості перекриттів канавок повністю регулярного мікрорельєфу

При визначенні відносних площ для рельєфів, що перетинаються необхідно врахувати площу перекриття та відповідну кількість таких елементів. Кількість таких елементів для повністю регулярного мікрорельєфу, визначиться за формулою:

$$k_n = i_0(i_0 - 1) \quad (2.25)$$

З рис. 2.16 визначаємо $tg\alpha$. Розглянемо прямокутний трикутник, з кутом рівним $\alpha = \arctg(4A_k/t_k)$, в якому протилежний до цього кута катет рівний $2 \cdot A_k$, а прилеглий $t_k/2$. Тоді $tg\alpha$:

$$tg\alpha = \frac{2 \cdot A_k}{t_k / 2} = \frac{4 \cdot A_k \cdot n_{об.х.}}{S_{нз.}} \quad (2.26)$$

Крок мікрорельєфу можна визначити із залежності

$$BC = \frac{b_k}{\sin\left(2 \cdot \arctg\left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k}\right)\right)} = \frac{b_k}{2 \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k}\right)\right) \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k}\right)\right)}$$

Розглянемо $\triangle OBC$ ($\angle BOC = 90^\circ$)

$$OC = BC \cdot \cos\alpha = \frac{b_k}{2 \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k}\right)\right) \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k}\right)\right)} \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k}\right)\right) = \frac{b_k}{2 \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_k}{t_k}\right)\right)}$$

Таким чином вираз для визначення площі перекриття матиме вигляд:

$$F_{неp} = \frac{b_k^2}{2 \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{кр}}{t_k}\right)\right)} \quad (2.27)$$

Відносну площу мікрорельєфу з врахуванням (2.27) визначають із залежності

$$F_6 = 100 \cdot \frac{i_0 \left[b_k \sqrt{\frac{S_{n3}^2}{n_{\text{дв.х.}}^2} + 16 \cdot A_k^2} + \frac{b_k^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \arctg\left(\frac{4 \cdot A_k \cdot n_{\text{дв.х.}}}{S_{n3}}\right) - \frac{4 \cdot A_k \cdot n_{\text{дв.х.}}}{S_{n3}}}{180} \right) - i_o(i_o - 1) \frac{b_k^2}{2 \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{4 \cdot A_{\text{кр}}}{t_k}\right)\right)} \right]}{n_{\text{дв.х.}} \cdot (0,5(i_0 + 1)(2 \cdot A_{\text{кр}} + 0,5 \cdot b_k))} \quad (2.28)$$

Отримана залежність дозволяє оцінити вплив геометричних та технологічних параметрів процесу формування на зміну відносної площі регулярного мікрорельєфу. Для цього побудовані графіки залежності (рис. 2.17 – рис. 2.20).

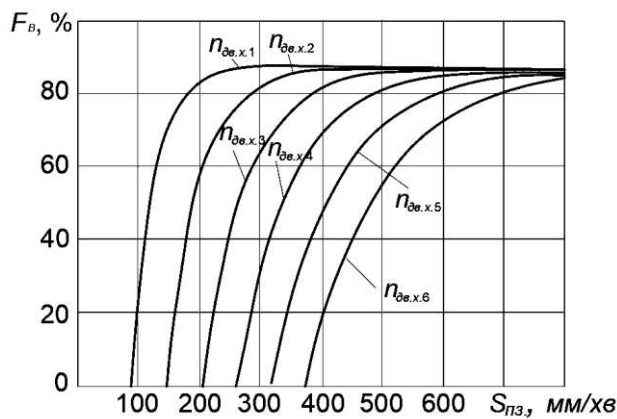


Рисунок 2.17. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_v від повздовжньої подачі інструменту, $S_{пз}$ при заданих $n_{\text{дв.х.}}$: $n_{\text{дв.х.}1} = 60$ об/хв; $n_{\text{дв.х.}2} = 90$ об/хв; $n_{\text{дв.х.}3} = 120$ об/хв; $n_{\text{дв.х.}4} = 150$ об/хв; $n_{\text{дв.х.}5} = 180$ об/хв; $n_{\text{дв.х.}6} = 210$ об/хв

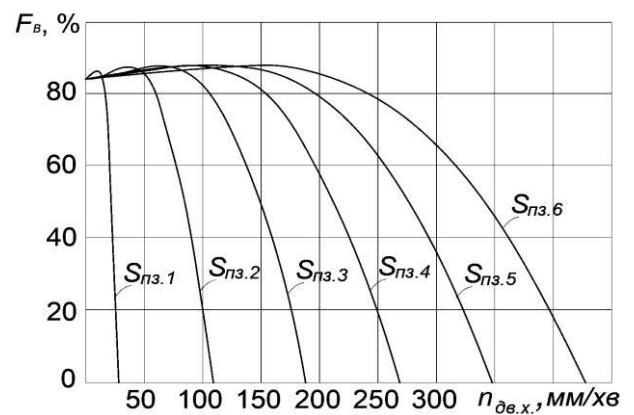


Рисунок 2.18. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_v від частоти $n_{\text{дв.х.}}$ осциляцій обкатників при заданих $S_{пз}$: $S_{пз1} = 50$ мм/хв; $S_{пз2} = 200$ мм/хв; $S_{пз3} = 350$ мм/хв; $S_{пз4} = 500$ мм/хв; $S_{пз5} = 650$ мм/хв; $S_{пз6} = 800$ мм/хв

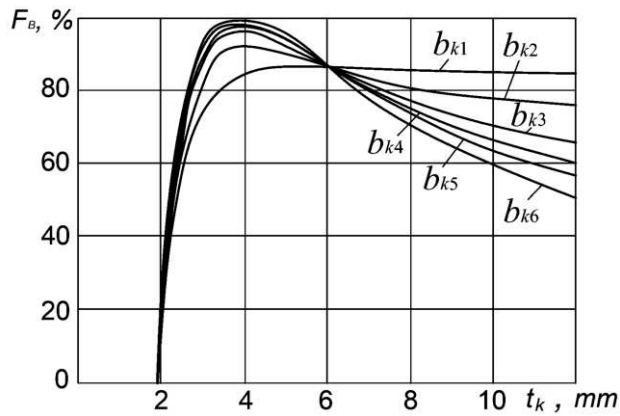


Рисунок 2.19. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_b від кроку канавки t_k при заданих e_{kp} : $e_{kp1} = 1$ мм; $e_{kp2} = 3$ мм; $e_{kp3} = 6$ мм; $e_{kp4} = 9$ мм; $e_{kp5} = 12$ мм; $e_{kp6} = 15$ мм

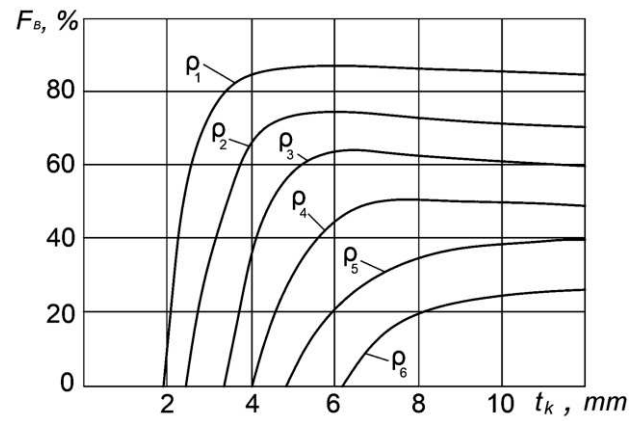


Рисунок 2.20. Графіки залежності відносної площі мікрорельєфу F_b від кроку канавки t_k при заданих ρ : $\rho_1 = 1$ мм; $\rho_2 = 2$ мм; $\rho_3 = 3$ мм; $\rho_4 = 4$ мм; $\rho_5 = 5$ мм; $\rho_6 = 6$ мм

Проведені дослідження дозволяють встановити вплив геометричних параметрів мікрорельєфу (ширини канавки, амплітуди канавки мікрорельєфу та осьового кроку канавки) та технологічних параметрів його формування (швидкості подачі, кількості подвійних ходів при вібраційному способі формування мікрорельєфу) на зміну відносної площі регулярного мікрорельєфу. Встановлено оптимальні межі залежних параметрів для забезпечення заданої відносної площі віброобробкування регулярних мікрорельєфів, сформованих на плоских поверхнях.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Розглянуто технологічні особливості формування регулярного мікрорельєфу I виду на плоских поверхнях методом вібраційного обробкування вібраційною голівкою із кульковими обкатниками. Отримано аналітичну залежність для визначення шляху, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при заданих режимах формування мікрорельєфу. Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі поверхні з регулярним

мікрорельєфом для рельєфу з паралельними канавками, сформованого на плоских поверхнях. Встановлено умови формування мікрорельєфу в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу та технологічних режимів його формування. Побудовано графіки залежності відносної площі віброобробчування F_6 від повздовжньої подачі інструменту, $S_{пз}$ та від частоти $n_{дв.х.}$ осциляцій обкатників, а також графіки відносної площі віброобробчування F_6 від кроку канавки t_k .

2. Розглянуто схеми формування частково регулярних мікрорельєфів з канавками, що не перетинаються (I вид), перетинаються (III вид) та повністю регулярного мікрорельєфу (IV вид). Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі регулярних та частково регулярних мікрорельєфів із різною міжосьовою відстанню канавок та врахуванням площі їх перекриття. Побудовані графічні залежності для визначення відносної площі регулярних мікрорельєфів в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу, швидкості подачі інструменту та кількості подвійних ходів, як найбільш впливових параметрів на відносну площу мікрорельєфу. Встановлено, що на зміну відносної площі мікрорельєфу в більшій мірі впливає зміна технологічних режимів формування мікрорельєфу – швидкості подачі та кількості подвійних ходів і в меншій мірі геометричні параметри мікрорельєфу – амплітуда та крок.

Розділ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ МІКРОРЕЛЬЄФУ ТА РЕЖИМІВ ФОРМУВАННЯ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХОНЬ

3.1 Планування експериментальних досліджень впливу типу мікрорельєфу та режимів формування на геометричні та експлуатаційні властивості поверхонь

Для перевірки запропонованих в роботі гіпотез передбачено проведення експериментальних досліджень із створення регулярного мікрорельєфу на дослідних зразках з подальшим визначенням параметрів якості їх поверхні та її експлуатаційних властивостей, зокрема маслоємності.

Для цього було виготовлено та промарковано партію дослідних експериментальних зразків із магнієвого сплаву AZ31 (рис. 3.1-3.2).

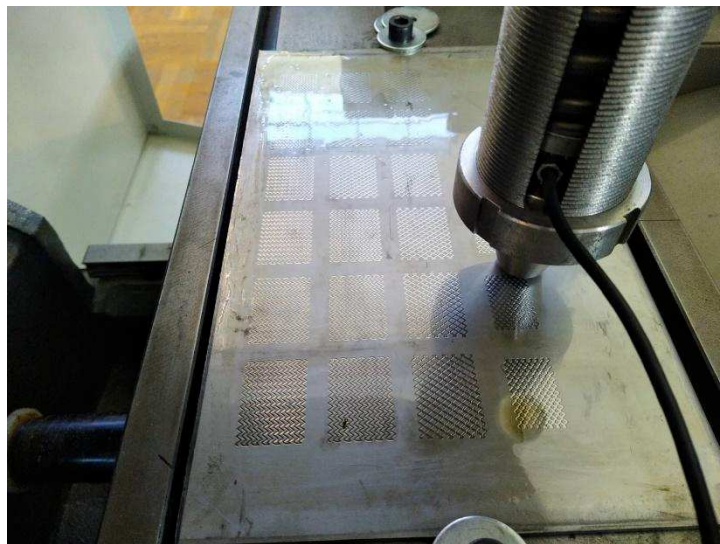


Рисунок 3.1. Процес виготовлення експериментальних зразків із формуванням на їх поверхні різних типів регулярних мікрорельєфів



Рисунок 3.2. Маркування експериментальних зразків із вказанням подачі інструменту

Поточне дослідження базується на методиках визначення деяких параметрів нерівності поверхні та критеріїв, запроваджених міжнародним стандартом ISO 21920-2:2021. Це зроблено з метою отримання співставних результатів з іншими нерівностями поверхні, одержаними різними методами обробки. Для оцінки здатності поверхонь з регулярними мікрорельєфами утримувати мастильну плівку предметом дослідження є кількісне визначення площі відповідно до параметра площі R_{ak2} згідно з ISO 21920-2 (рисунок 3.3).

Як видно з рисунка 3.3, площа R_{ak2} дорівнює площі прямокутного трикутника, утвореного глибиною западин. Вертикальна сторона трикутника позначається як R_{vk} (рисунок 3.3, а), а горизонтальна сторона розраховується як $100\% - R_{mrk2}$ відповідно.

Для визначення висоти критерію R_{vk} пряма лінія апроксимується за лінійною ділянкою F кривої зношування, яка перетинає 100% по горизонтальній

осі праворуч (рисунок 3.3, б). Від цієї точки проводиться горизонтальна лінія, паралельна осі x (тобто позначена як «зношення, %» на рисунку 3.3, б). Її перетин із кривою Аббота-Фаєрстоуна визначає значення зношування R_{mrk2} у западинах профілю.

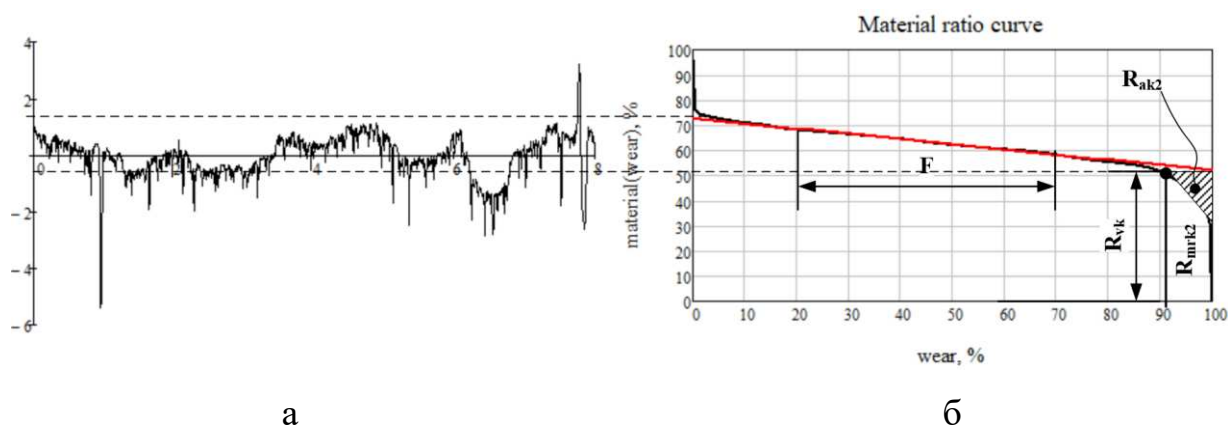


Рисунок 3.3. Профілограма та відповідна їй діаграма зношування MRC (Аббота-Фаєрстоуна) поверхні дослідного зразка без сформованого ЧРМР: а – профілограма поверхні; б – відповідна їй діаграма Аббота-Фаєрстоуна

Використовуючи ці параметри, площу трикутника R_{ak2} можна приблизно розрахувати за формулою:

$$R_{ak2} = \frac{R_{vk} \cdot (100\% - R_{mrk2})}{200} \quad (3.1)$$

Критерій R_{ak2} може використовуватись як оцінка здатності отриманого профілю поверхні утримувати мастильну плівку. Стандарт ISO 21920-2 зазначає, що параметри R_k , R_{pk} , R_{vk} , R_{mrk1} та R_{mrk2} є релевантними у випадку, коли крива зношування має S-подібну форму, тобто лише одну точку перегину. Крім того, у стандарті вказано, що S-подібна крива є найбільш характерною для кривої зношування у випадку притертих, шліфованих або хонінгованих поверхонь.

Криві зношування (MRC) можна легко побудувати, використовуючи дані отримані з профілограм для профілю поверхні з ЧРМР, що зберігаються у вигляді файлу протоколу контролю у форматі MS Excel, за допомогою наступного простого алгоритму:

$$Rmc(c) = \begin{cases} \text{For } Rt_{min} \leq c \leq Rt_{max} \\ \text{For } 0 \leq i \leq (l_e)_{points} \\ Rml_c = Rml_c + \begin{cases} \Delta, & Rt_i \geq Rt_c \\ 0, & Rt_i < Rt_c \end{cases} \\ \text{End For} \\ \text{End For} \\ Rmc_c = \frac{Rml_c}{l_e} \cdot 100, \% \end{cases}, \quad (3.2)$$

де $Rmc(c)$ – вектор, який містить обчислені значення опорної довжини профілю поверхні в межах загальної висоти ЧРМР, у відсотках;

- c, i – відповідно індекси рівнів загальної висоти та кількість вимірних значень на відрізьку довжини оцінювання профілю поверхні;
- Rt , мм – загальна висота профілю поверхні;
- l_e , мм – довжина оцінювання профілю поверхні;
- Rml , мм – довжина оцінювання профілю поверхні на заданому c рівні;
- Δ , мм – дискретна довжина вздовж осі x вимірної профілограми.

Після обчислення значень параметрів, на наступному етапі їх візуалізують графічно з метою ідентифікації лінійної ділянки F (рисунок 3.3, б) кривої зношування. Координати x, y елементів вектора Rmc , які найкраще відповідають лінійній ділянці кривої зношування, використовуються для обчислення коефіцієнтів вільного члена та нахилу прямої найкращого наближення за методом найменших квадратів. У результаті отримують відповідні діаграми зношування, які мають форму, показану на рисунку 3.3, б. Вони використовуються для визначення параметрів профілю поверхні, а також для подальшої оцінки експлуатаційних характеристик профілю поверхні з ЧРМР.

На основі принципової схожості між хонінгованими та частково обкатаними поверхнями для оцінювання топографії поверхні було використано той самий критерій, що й для поверхонь з ЧРМР першого, другого та третього типів. Вони були сформовані шляхом обкатування деформувальним елементом у вигляді кульки [67] на плоских поверхнях випробувальних зразків, виготовлених з нержавіючої сталі марки 304L.

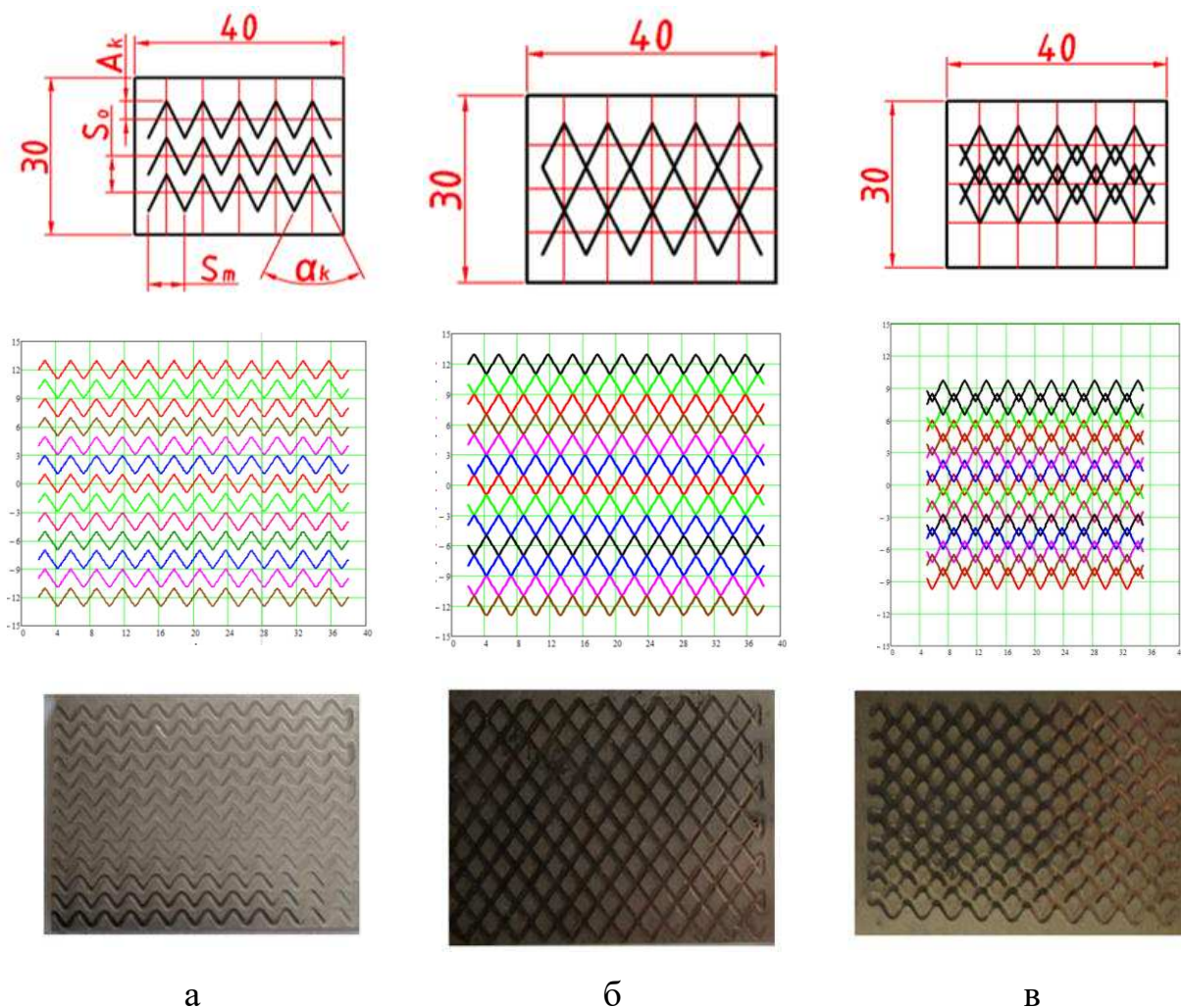


Рисунок 3.4. Спроектовані, змодельовані та виготовлені дослідні зразки з сформованим регулярним мікрорельєфом із: (а) I– типу; (б) II– типу; (в) III– типу

Для отримання відповідних типів ЧРМР було згенеровано три різні траєкторії руху інструмента. Координати опорних точок розраховувались розробленою програмою в середовищі Mathcad 15.0 (додатки 4, 5). Отримані топографії поверхні після їх застосування показано на рисунку 3.4.

Було досліджено повний набір комбінацій між трьома досліджуваними типами ЧРМР (I, II, III) та трьома різними подачами деформувального елемента (500, 1000, 1500 мм/хв) відповідно до повного факторного ортогонального плану експерименту [46], що відображено у таблиці 3.1. Сила деформації залишалась сталою для всіх обкатаних зразків і становила $F = 400$ Н. Значення подачі становили $f_{in,i} = 500, 1000$ та 1500 мм/хв для всіх трьох типів ЧРМР. Для кожної комбінації типу ЧРМР і подачі було обкатано по три однакові зразки.

Відповідні ЧРМР були сформовані шляхом обкатування деформувальним елементом у вигляді кульки, яке виконувалося на фрезерному верстаті з ЧПК НААС (США) моделі ТМ-1 за допомогою спеціально розробленого інструмента для кульового обкатування, що не використовує примусових вібрацій [65].

Після формування ЧРМР із листового матеріалу були вирізані зразки розміром $30 \times 40 \times 4$ мм за допомогою волоконного лазерного верстата GN NCF 3015. Топографію поверхні було виміряно за допомогою приладу для визначення шорсткості поверхні – Mitutoyo, America Corporation, США, модель SurfTest SJ-301 (рис. 3.7, а), при цьому для всіх зразків використовувався один і той самий напрямок вимірювання відповідно до схеми, наведеної на рисунках 3.6, 3.7, б–г. Для обчислення параметрів кривої зношування (MRC) використовувалися R-профілі з вимірних профілограм за такими налаштуваннями: довжина траси вимірювання $l_e=8$ мм; дискретна довжина вздовж осі x становила $\Delta=5$ мкм, що є апаратною фіксованою величиною, встановленою виробником приладу.

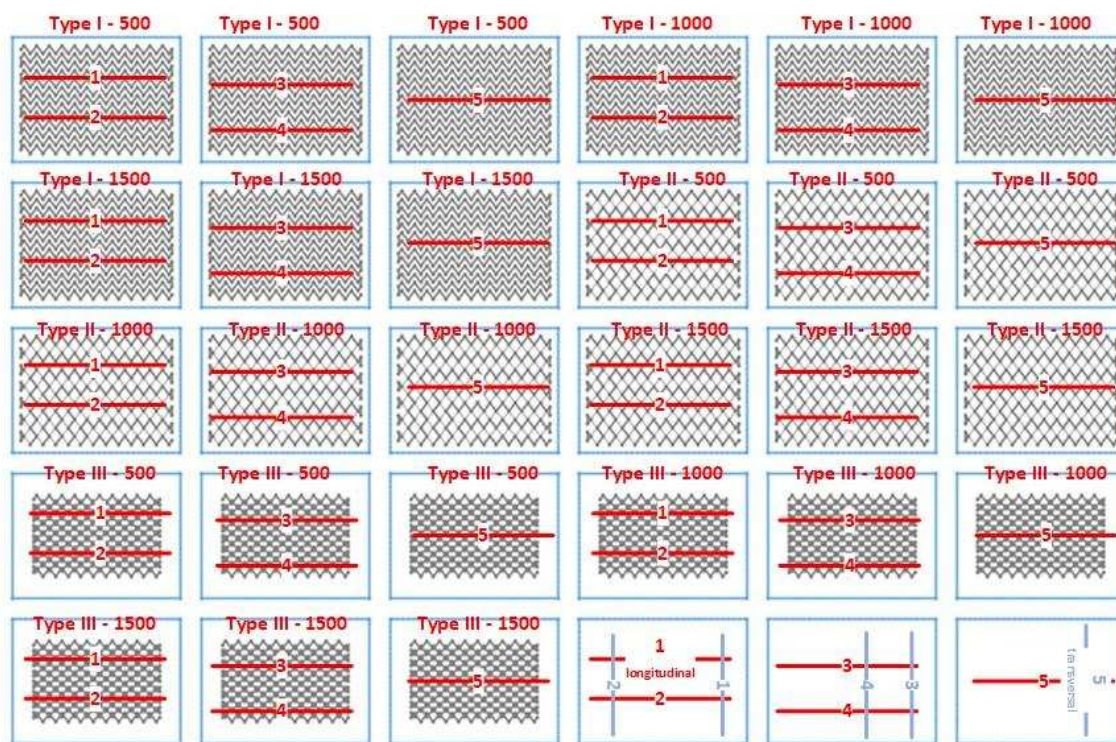


Рисунок 3.5. Схема розміщення трас вимірювання параметрів шорсткості поверхні із сформованим мікрорельєфом профілометром SurfTest SJ-301 MITUTOYO

Також було отримано три дослідні зразки з того ж матеріалу, на поверхні яких не формувались ЧРМР. Їх топографія також була виміряна (див. рядки 28–30 у таблиці 4.1) і використана для порівняння характеристик топографії поверхні вихідного матеріалу з тими, що були отримані після проведення операцій формування ЧРМР (рис. 3.5).

Для кожної комбінації експериментального плану з таблиці 3.1 було виміряно по три траси, використовуючи зразки, обкатані кулькою, що відповідали умовам експерименту (рис. 3.6, б-г).

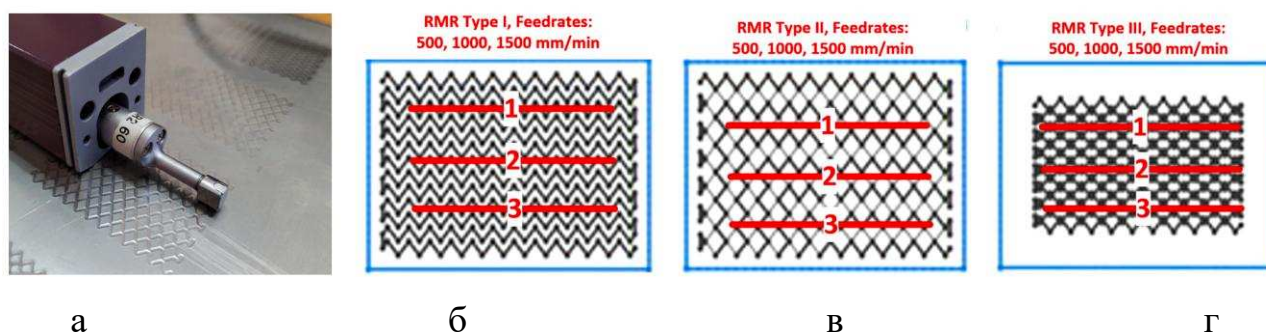


Рисунок 3.6. а) Пристрій Mitutoyo, SurfTest SJ-301 для заміру параметрів шорсткості; Траси вимірювання шорсткості поверхні дослідних зразків із МРМ: б) I-го типу; в) II-го типу; г) III-го типу.

Таким чином при проведенні експериментальних досліджень необхідно визначити наступні стандартизовані параметри профілю поверхні R_a , R_{zx} , R_{mrk2} , R_{vk} , R_{ak2} , $R_{mc(25\%)}$.

Також для порівняння заплановано провести вимірювання вищевказаних параметрів для дослідних зразків виконаних із тих же матеріалів, з такою ж попередньою обробкою поверхні, однак без формування регулярного мікрорельєфу (зразки 28, 29, 30).

3.2 Інструмент та обладнання для проведення експериментальних досліджень

Для формування канавок регулярного мікрорельєфу при проведенні експериментальних досліджень використано інструмент (рис. 3.7) [65], який разом з обладнанням (верстат ТМ-1) знаходиться на кафедрі технологій виробництва та верстатів Технічного університету Варни (Болгарія), де були проведені експериментальні дослідження.

Збірка модернізованого інструменту для SPD показана на рисунку 3.7, а). Вона складається з основного корпусу інструмента (поз. 1), який завдяки прямому хвостовику ($\text{Ø}32\text{k}6$) встановлюється у стандартні патрони фрезерних верстатів (тип ISO 40), які мають стандартизовані конусні хвостовики відповідно до DIN 2080 або DIN 69871 (рис. 3.7, б).

Зовнішній діаметр корпусу інструмента (поз. 1) має метричну різьбу M60h2, на яку накручуються задня гайка (поз. 12) та передня гайка (поз. 2). У задній внутрішній частині корпусу (поз. 1) розташована напрямна втулка фланця задньої пружини (поз. 8).

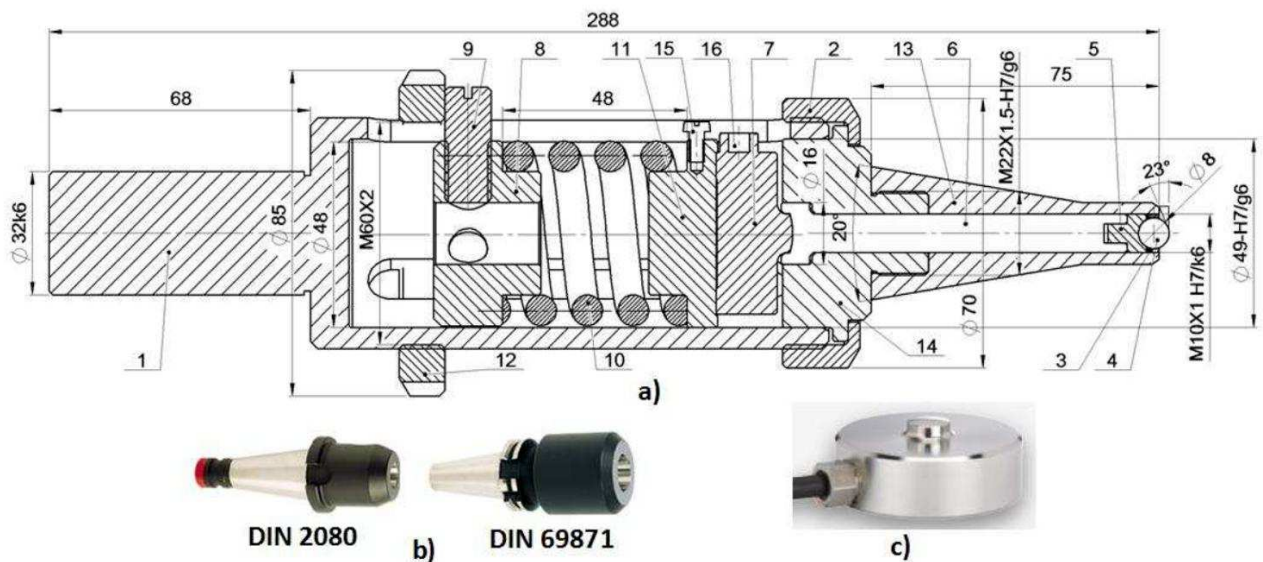


Рисунок 3.7. Інструмент для формування регулярних мікрорельєфів із регулюванням зусилля деформування [65]:

- 1 – корпус інструменту; 2 – передня гайка; 3 – передня бронзова втулка; 4 – сферичним деформувальний елемент; 5 – бронзова втулка; 6 – головка

плунжера; 7 – датчик сили типу FCM; 8 – задня втулка 9 – різьбові штифти; 10 – гвинтова пружина; 11 – передня втулка; 12 – задня гайка; 13,14 – частини конічної фланцевої втулки; 15 – гвинт; 16 – палець

По її периферії радіально під кутом 120° розміщено три різьбові штифти M12 (поз. 9). Вони направляються трьома поздовжніми пазами корпусу інструмента (поз. 1), і таким чином задня втулка (поз. 8) може переміщатися в осьовому напрямку. Напрямна втулка фланця задньої пружини знаходиться в контакті з гвинтовою пружиною (поз. 10), що забезпечує пружний контакт між сферичним роликовим елементом (поз. 4) і оброблюваною поверхнею, а також необхідне стискуjące зусилля.

У конструкції інструмента використано стандартну виготовлену гвинтову шліфовану пружину (Hennlich, Чехія), яка має зовнішній діаметр 48 мм та довжину 65 мм, виготовлена з пружинного дроту (DIN 2076) діаметром 8 мм, забезпечує максимальне зусилля до 3200 Н при максимальній довжині стиску 48 мм. Гвинтова пружина (поз. 10) тисне на передню втулку (поз. 11), де встановлений датчик сили типу FCM (поз. 7). Передня частина датчика сили (поз. 7) тисне на головку плунжера (поз. 6), який через бронзову втулку (поз. 5), встановлену на його передньому кінці, передає зусилля від пружини на сферичний роликовий елемент (поз. 4).

Роликові елементи (виготовлені з високоміцної сталі 100C6) зазвичай беруться зі зношених підшипників. Вони мають високу твердість ($60\div 65$ HRC) і діаметри від 6 до 8 мм. Конічна фланцева втулка складається з двох зібраних частин (поз. 13 і 14), з'єднаних різьбовим з'єднанням M22X1.5, і має функцію спрямовування плунжера 6 в його осьовому русі, не допускаючи радіального люфту кульки.

Для цього передня бронзова втулка (поз. 3) є змінною — залежно від діаметра використовуваної кульки (6 або 8 мм). Відсутність радіального люфту забезпечується бронзовою втулкою (поз. 3), яка зібрана з різьбовим з'єднанням M10X1, а її внутрішній діаметр точно відповідає діаметру використаної кульки.

Коли кулька не контактує з оброблюваною поверхнею, зусилля від натягнутої пружини врівноважується корпусом інструмента (поз. 1), передаючись через головку плунжера (поз. 6).

Інструмент використовувався на Вертикально-фрезерному верстаті з ЧПУ HAAS TM 1 (рис. 3.8), технічна характеристика якого подана у додатку 1.



Рисунок 3.8. Вертикально-фрезерний верстат з ЧПУ HAAS TM 1

Після вимірювання параметрів профілю поверхні з ЧРМР було побудовано відповідні криві зношування (MRC) Аббота-Фаєрстоуна за методикою, описаною в розділі 3.1, та на основі вимірних даних профілограм. Приклади отриманих профілограм і кривих MRC для кожного з трьох типів ЧРМР і значень подачі наведено на рисунках 3.9 – 3.11.

3.3 Результати експериментальних досліджень впливу типу мікрорельєфу та режимів формування на геометричні та експлуатаційні властивості поверхонь

Відповідно до рекомендацій EN ISO 21920-2 та методики проведення експерименту було обчислено стандартизовані параметри: середнє арифметичне відхилення профілю (R_a), максимальна висота ділянки (R_{zx}), приблизна площа

трикутника (R_{ak2}) та відносна опорна довжина профілю при 25% зносу матеріалу $R_{mc(25\%)}$.

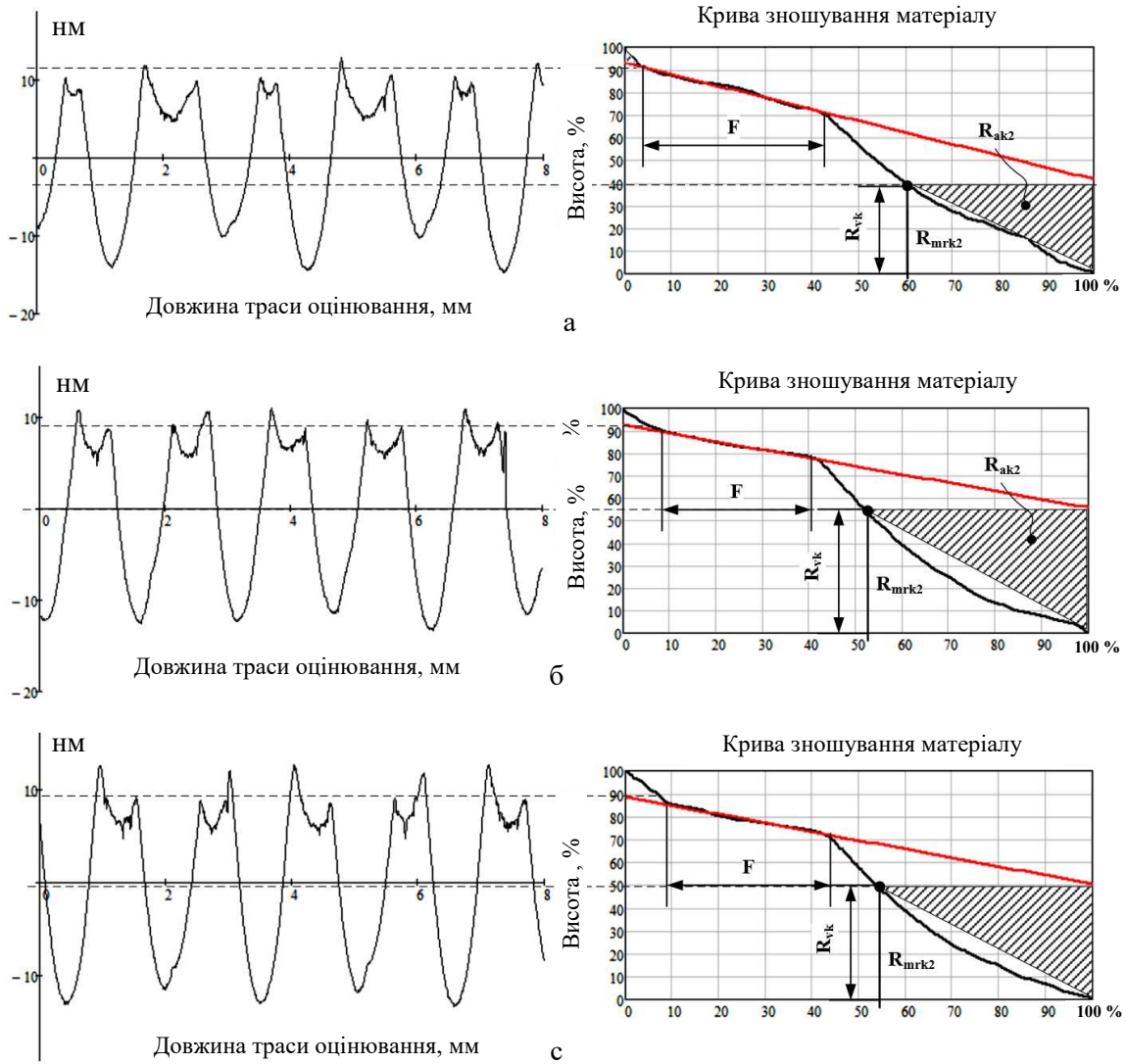


Рисунок 3.9. Профілограми та діаграми зношування (Аббота-Фаєрстоуна) для І типу мікрорельєфу, отримані при:
а) 500 мм/хв; б) 1000 мм/хв; в) 1500 мм/хв.

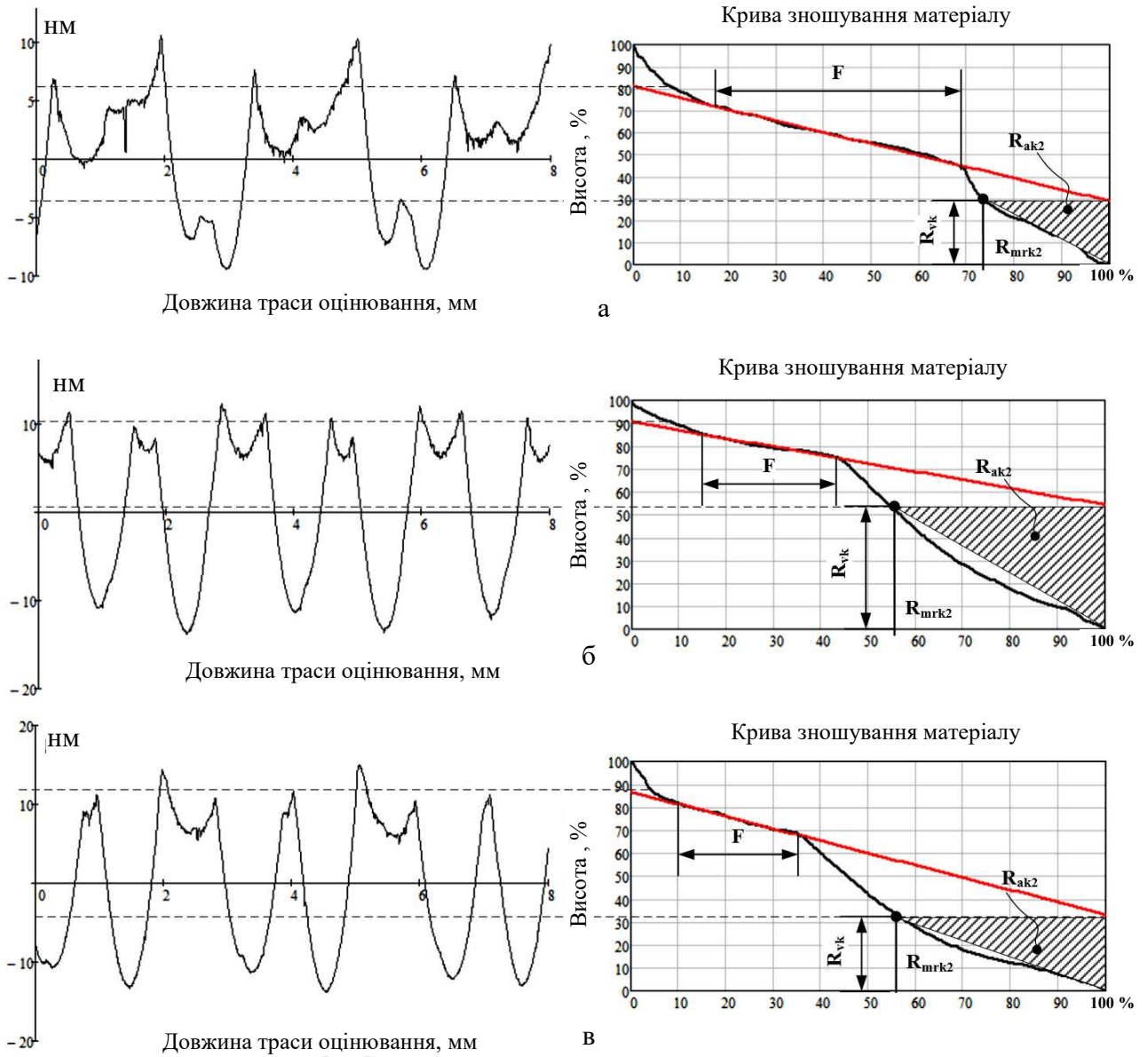


Рисунок 3.10. Профілограми та діаграми зношування (Аббота-Фаерстоуна) для II типу мікрорельєфу, отримані при: а) 500 мм/хв; б) 1000 мм/хв; в) 1500 мм/хв.

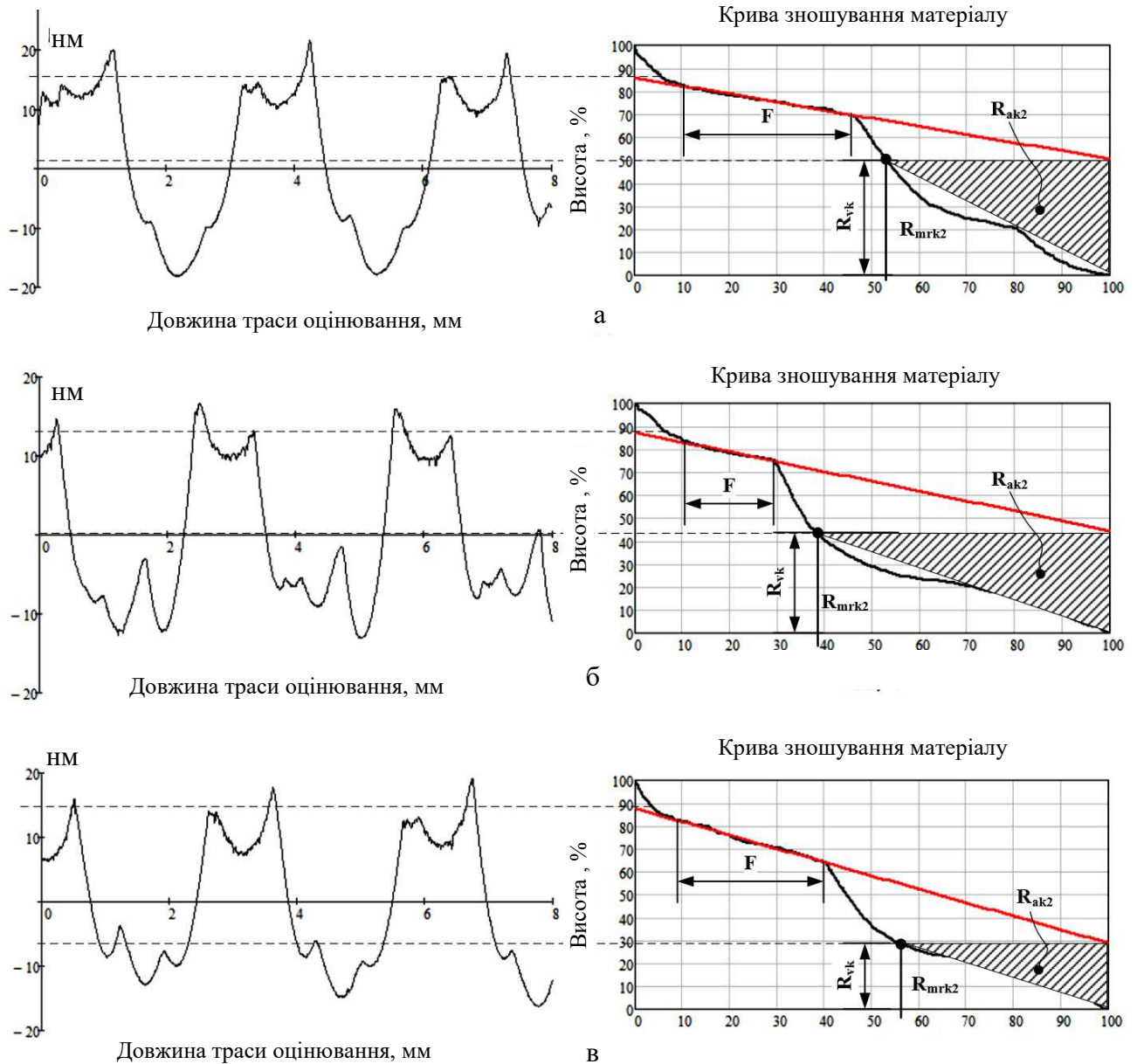


Рисунок 3.11. Профілограми та діаграми зношування (Аббота-Фаерстоуна) для III типу мікрорельєфу, отримані при: а) 500 мм/хв; б) 1000 мм/хв; в) 1500 мм/хв.

Функція $R_{mc(c)}$ – це відношення параметра довжини профілю на заданому рівні c в межах довжини оцінювання l_e . Вона обчислюється за наступним рівнянням:

$$R_{mc(c)} = \frac{R_{ml(c)}}{l_e} \quad (3.3)$$

Функція $R_{mc(c)}$ є важливою для оцінювання, оскільки вона безпосередньо впливає на зносостійкість спряжених поверхонь і залежить від відносної довжини профілю поверхні. Її значення виражається у відсотках, проте в даному дослідженні воно визначалося як частка від 1.

Отримані значення узагальнено в таблиці 3.1 і використано далі для проведення регресійного аналізу з метою виявлення впливу типів ЧРМР і величини подачі на ці параметри профілю поверхні.

Таблиця 3.1. Геометричні параметри профілю поверхні з ЧРМР та вихідного матеріалу (позначення відповідають до EN ISO 21920-2).

| № | Тип ЧРМР | Подача $f_{in.i}$, мм/хв | R_a , нм | R_{zx} , нм | R_{mrk2} , мм | R_{vk} , нм | R_{ak2} , мм ² | $R_{mc}(25\%)$, - |
|----|----------|---------------------------|------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | I | 500 | 8.14 | 32.11 | 2.285 | 8.03 | 0.009171 | 0.291 |
| 2 | I | 500 | 7.54 | 27.56 | 2.135 | 6.89 | 0.007353 | 0.319 |
| 3 | I | 500 | 7.27 | 26.15 | 2.125 | 8.05 | 0.008549 | 0.231 |
| 4 | I | 1000 | 8.86 | 28.80 | 2.255 | 13.90 | 0.015676 | 0.504 |
| 5 | I | 1000 | 8.52 | 28.11 | 1.955 | 11.04 | 0.010794 | 0.469 |
| 6 | I | 1000 | 8.52 | 28.03 | 1.890 | 10.04 | 0.009487 | 0.469 |
| 7 | I | 1500 | 7.64 | 25.11 | 1.595 | 5.02 | 0.004004 | 0.302 |
| 8 | I | 1500 | 5.10 | 23.64 | 1.215 | 4.92 | 0.002992 | 0.319 |
| 9 | I | 1500 | 5.09 | 23.33 | 1.223 | 4.91 | 0.002989 | 0.311 |
| 10 | II | 500 | 6.74 | 27.50 | 1.275 | 2.95 | 0.001879 | 0.171 |
| 11 | II | 500 | 7.37 | 26.41 | 1.230 | 3.05 | 0.001874 | 0.268 |
| 12 | II | 500 | 4.22 | 19.97 | 1.575 | 3.99 | 0.003145 | 0.134 |
| 13 | II | 1000 | 3.31 | 19.41 | 1.290 | 2.04 | 0.001318 | 0.068 |
| 14 | II | 1000 | 5.60 | 21.02 | 0.600 | 1.00 | 0.000300 | 0.232 |
| 15 | II | 1000 | 4.92 | 20.41 | 1.520 | 3.06 | 0.002327 | 0.258 |
| 16 | II | 1500 | 7.87 | 28.74 | 2.875 | 6.93 | 0.009969 | 0.196 |
| 17 | II | 1500 | 7.24 | 24.86 | 2.525 | 7.96 | 0.010044 | 0.338 |

| | | | | | | | | |
|---|-----|------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 18 | II | 1500 | 3.76 | 23.09 | 0.675 | 6.02 | 0.002033 | 0.159 |
| 19 | III | 500 | 11.21 | 39.75 | 2.210 | 11.93 | 0.013177 | 0.297 |
| 20 | III | 500 | 13.42 | 40.21 | 2.460 | 21.12 | 0.025972 | 0.393 |
| 21 | III | 500 | 10.66 | 40.87 | 3.140 | 13.96 | 0.021910 | 0.344 |
| 22 | III | 1000 | 9.41 | 30.22 | 3.250 | 15.11 | 0.024554 | 0.375 |
| 23 | III | 1000 | 8.12 | 29.71 | 3.680 | 7.92 | 0.014578 | 0.233 |
| 24 | III | 1000 | 8.29 | 30.28 | 1.625 | 4.04 | 0.003281 | 0.230 |
| 25 | III | 1500 | 10.73 | 38.30 | 2.275 | 18.15 | 0.020641 | 0.474 |
| 26 | III | 1500 | 10.79 | 39.65 | 2.720 | 17.85 | 0.024272 | 0.413 |
| 27 | III | 1500 | 11.98 | 37.58 | 2.670 | 8.90 | 0.011882 | 0.303 |
| Параметри топографії поверхні дослідних зразків без мікрорельєфу: | | | | | | | | |
| 28 | - | - | 0.32 | 3.41 | 0.96 | 1.023 | 0.000491 | 0.861 |
| 29 | - | - | 0.24 | 3.53 | 1.41 | 1.152 | 0.000813 | 0.825 |
| 30 | - | - | 0.28 | 2.84 | 0.56 | 0.64 | 0.000179 | 0.869 |

Параметри R_a , R_{mrk2} та R_{vk} включені в таблицю 3.1 лише для інформативності та достовірності результатів досліджень. Контрольний прилад видає ці значення в автоматичному режимі.

З метою оцінки впливу трьох різних типів ЧРМР та параметра подачі при формуванні ЧРМР кулькою на згадані вище експлуатаційні характеристики обкатаних поверхонь було використано метод регресійного аналізу. Як незалежні змінні (тобто предиктори) у цьому дослідженні обрано вищезгадані часткові типи ЧРМР та значення подачі. У якості залежних змінних було вибрано стандартизовані параметри профілю поверхні: R_{zx} , R_{ak2} та $R_{mc(25\%)}$. Для статистичного моделювання досліджуваних залежностей було застосовано модель множинної лінійної регресії з двофакторною взаємодією між предикторами. Для більш точного проведення статистичного аналізу використовувалося програмне забезпечення Minitab 19 (Minitab, LLC, PA, USA).

Отримані коефіцієнти рівняння регресії для критерію максимальної висоти R_{zx} мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
R_{zx}(RMR, f) = & 28.934 - 1.908 \cdot RMR_I - 5.444 \cdot RMR_{II} + 7.352 \cdot RMR_{III} \\
& + 2.236 \cdot f_{500} - 2.704 \cdot f_{1000} + 0.467 \cdot f_{1500} - - 0.655 \cdot RMR_I f_{500} + \\
& 4.018 \cdot RMR_I f_{1000} - 3.363 \cdot RMR_I f_{1500} - 1.100 \cdot RMR_{II} f_{500} - 0.506 \cdot RMR_{II} f_{1000} + \\
& + 1.606 \cdot RMR_{II} f_{1500} + 1.755 \cdot RMR_{III} f_{500} - 3.512 \cdot RMR_{III} f_{1000} + \\
& 1.757 \cdot RMR_{III} f_{1500}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Отримана модель $R_{zx}(\text{ЧРМР}, f)$ має стандартне відхилення $\sigma = 2.04595$ та коефіцієнт детермінації $R^2 = 93,30\%$, що свідчить про хорошу відповідність експериментальним даним. Також було проведено дисперсійний аналіз (ANOVA) (таблиця 3.2), з якої видно, що нульова гіпотеза H_0 не підтверджується для обох предикторів, а також для їхньої взаємодії. Це означає, що тип ЧРМР і подача мають статистично значущий вплив на максимальну висоту за критерієм R_{zx} . Із колонки «Відсоток впливу» у таблиці 3.2 видно, що предиктор «тип ЧРМР» має 69,84% загального впливу, тоді як подача f та взаємодія предикторів другого порядку загалом ЧРМР* f мають 23,46% впливу. Загальна похибка отриманої моделі становить 6,7%.

Таблиця 3.2. Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) для рівняння регресії (3.4)

| Джерело | DF | Seq SS | Відсоток впливу | Adj SS | Adj MS | F-параметр | P-параметр |
|--|----|---------|-----------------|---------|---------|------------|------------|
| Модель $R_{zx}(\text{ЧРМР}, f)$ | 8 | 1049.97 | 93.30% | 1049.97 | 131.247 | 31.35 | 0.000 |
| Тип ЧРМР | 2 | 785.92 | 69.84% | 785.92 | 392.961 | 93.88 | 0.000 |
| Подача | 2 | 112.77 | 10.02% | 112.77 | 56.383 | 13.47 | 0.000 |
| Взаємодія параметрів (Тип ЧРМР*подача) | 4 | 151.29 | 13.44% | 151.29 | 37.821 | 9.04 | 0.000 |
| Похибки | 18 | 75.35 | 6.70% | 75.35 | 4.186 | | |
| Всього | 26 | 1125.32 | 100.00% | | | | |

Відповідні ЧРМР були сформовані шляхом обкатування деформувальним елементом у вигляді кульки, яке виконувалося на фрезерному верстаті з ЧПК НААС (США) моделі ТМ-1 за допомогою спеціально розробленого інструмента для кульового обкатування, що не використовує примусових вібрацій.

Отримані коефіцієнти рівняння регресії для критерію R_{ak2} мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 R_{ak2} (\text{ЧРМР}, f) = & 0.009784 - 0.00189 \cdot RMR_I - 0.00613 \cdot RMR_{II} + \\
 & 0.00802 \cdot RMR_{III} + 0.00055 \cdot f_{500} - 0.00064 \cdot f_{1000} + + 0.00009 \cdot f_{1500} - \\
 & 0.00009 \cdot RMR_I f_{500} + 0.00473 \cdot RMR_I f_{1000} - 0.00465 \cdot RMR_I f_{1500} - \quad (3.5) \\
 & 0.00191 \cdot RMR_{II} f_{500} - \quad -0.00170 \cdot RMR_{II} f_{1000} + 0.00361 \cdot RMR_{II} f_{1500} \\
 & + 0.00199 \cdot RMR_{III} f_{500} - 0.00303 \cdot RMR_{III} f_{1000} + 0.00104 \cdot RMR_{III} f_{1500}
 \end{aligned}$$

Отримана модель $R_{ak2}(RMR, f)$ має стандартне відхилення $\sigma = 0,0050683$ та коефіцієнт детермінації $R^2 = 72,01\%$, що свідчить про гіршу відповідність, ніж у випадку параметра R_{zx} . Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) (таблиця 3.3) показують, що нульова гіпотеза H_0 не підтверджується лише для предиктора «тип ЧРМР», тоді як для предиктора «подача» та взаємодії між ними вона може бути відхилена.

Таким чином, тип ЧРМР є єдиним фактором, що має статистично значущий вплив на критерій апроксимованої площі западин R_{ak2} . Подача f у цьому випадку має несуттєвий вплив. Із таблиці 3.3 видно, що предиктор «тип ЧРМР» має 57,49% загального впливу, тоді як подача — лише 0,39%. Взаємодія предикторів другого порядку має приблизно 14% впливу, однак, оскільки значення P перевищує 0,05, цей вплив не можна вважати статистично значущим.

Загальна похибка отриманої моделі (3.5) становить майже 28%, що зумовлено характером зміни кривих Аббота-Фаєрстоуна, побудованих для профілю поверхні з ЧРМР. Як видно, вони не мають форми S-кривої, описаної в

стандарті ISO 21920, особливо в тих ділянках, що відповідають западинам профілю поверхні.

Таблиця 3.3. Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) для рівняння регресії (3.5).

| Джерело | DF | Seq SS | Відсоток впливу | Adj SS | Adj MS | F-параметр | P-параметр |
|---|----|----------|-----------------|----------|----------|------------|------------|
| Модель R_{ak2} (ЧРМР, f) | 8 | 0.001190 | 72.01% | 0.001190 | 0.000149 | 5.79 | 0.001 |
| Тип ЧРМР | 2 | 0.000950 | 57.49% | 0.000950 | 0.000475 | 18.49 | 0.000 |
| Подача | 2 | 0.000006 | 0.39% | 0.000006 | 0.000003 | 0.13 | 0.882 |
| Взаємодія параметрів (Тип ЧРМР*подача) | 4 | 0.000233 | 14.13% | 0.000233 | 0.000058 | 2.27 | 0.102 |
| Похибки | 18 | 0.000462 | 27.99% | 0.000462 | 0.000026 | | |
| Всього | 26 | 0.001652 | 100.00% | | | | |

Тип мікрорельєфу здійснює домінуючий вплив (57.49%) на маслоємність поверхні з ЧРМР. Разом з цим величина подачі деформувального елемента практично не впливає (0.39%) на цей параметр.

Отримані коефіцієнти рівняння регресії для критерію $R_{mc(25\%)}$ мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 R_{mc(25\%)}(RMR, f) = & 0.3003 + 0.0578 \cdot RMR_I - 0.0977 \cdot RMR_{II} + \\
 & 0.0399 \cdot RMR_{III} - 0.0283 \cdot f_{500} + 0.0150 \cdot f_{1000} + \quad + 0.0133 \cdot f_{1500} - \\
 & 0.0494 \cdot RMR_I f_{500} + 0.1076 \cdot RMR_I f_{1000} - 0.0581 \cdot RMR_I f_{1500} + \quad (3.6) \\
 & 0.0167 \cdot RMR_{II} f_{500} - \quad - 0.0317 \cdot RMR_{II} f_{1000} + 0.0150 \cdot RMR_{II} f_{1500} + \\
 & 0.0328 \cdot RMR_{III} f_{500} - 0.0759 \cdot RMR_{III} f_{1000} + 0.0431 \cdot RMR_{III} f_{1500}
 \end{aligned}$$

Отримана стохастична модель $R_{mc(25\%)}(\text{ЧРМР}, f)$ має стандартне відхилення $\sigma = 0,0695517$ та коефіцієнт детермінації $R^2 = 71,99\%$, що свідчить про подібний ступінь відповідності, як і у випадку параметра R_{ak2} .

Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) (таблиця 3.4) є досить подібними до тих, що були отримані для критерію R_{ak2} . Нульова гіпотеза H_0 не підтверджується для предикторів «тип ЧРМР» та їхньої взаємодії, тоді як для предиктора «подача f » її не можна відхилити. Отже, тип ЧРМР та його взаємодія з подачею є факторами, що мають статистично значущий вплив на апроксимовану функцію матеріального співвідношення $R_{mc(25\%)}$.

Подача також має несуттєвий вплив на цей критерій. Як видно з таблиці 3.4, предиктор «тип ЧРМР» має 41,88% загального впливу, тоді як подача – лише 3,49%. Взаємодія предикторів другого порядку має 26,62% впливу, і її параметр P не перевищує 0,05, тому її можна вважати статистично значущою.

Таблиця 3.4. Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) для рівняння регресії (3.6).

| Джерело | DF | Seq SS | Відсоток впливу | Adj SS | Adj MS | F-параметр | P-параметр |
|--|----|---------|-----------------|---------|----------|------------|------------|
| Модель $R_{mc(25\%)}(\text{ЧРМР}, f)$ | 8 | 0.22383 | 71.99% | 0.22383 | 0.027978 | 5.78 | 0.001 |
| Тип ЧРМР | 2 | 0.13021 | 41.88% | 0.13021 | 0.065107 | 13.46 | 0.000 |
| Подача | 2 | 0.01085 | 3.49% | 0.01085 | 0.005425 | 1.12 | 0.348 |
| Взаємодія параметрів (Тип ЧРМР*подача) | 4 | 0.08276 | 26.62% | 0.08276 | 0.020691 | 4.28 | 0.013 |
| Похибки | 18 | 0.08707 | 28.01% | 0.08707 | 0.004837 | | |
| Всього | 26 | 0.31090 | 100.00% | | | | |

Загальна похибка отриманої моделі (3.6) знову становить близько 28%, з тієї ж причини, що і для апроксимованої площі западин R_{ak2} . Як видно, криві не мають форми S-кривої, описаної в стандарті ISO 21920, особливо в ділянках, що відповідають западинам профілю поверхні.

Статистична оцінка рівняння регресії (3.6) показує, що на несучу здатність поверхні (параметр $R_{mc(25\%)}$ – відносна опорна довжина профілю) найбільший вплив має тип ЧРМР, тоді як подача $f_{in,i}$ має суттєвий вплив лише у взаємодії другого порядку між ними.

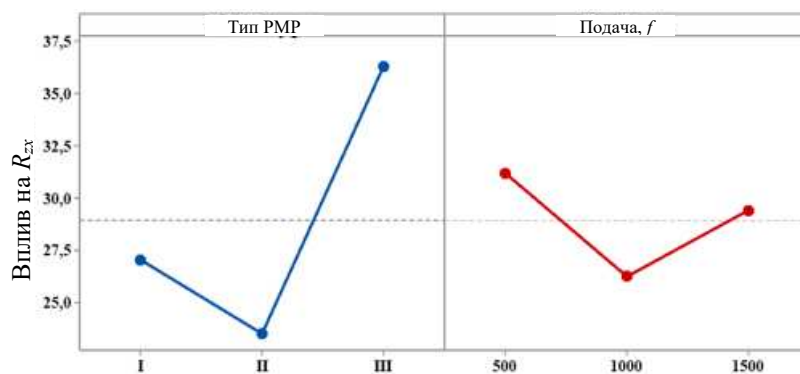
3.4. Аналіз та оцінка основних ефектів та взаємодій

Діаграми основних ефектів та взаємодій, отримані з регресійних моделей (рівняння 3.4 – 3.6), наведені на рисунку 3.13. Вони використовуються для аналізу впливу предикторів на поведінку залежних змінних.

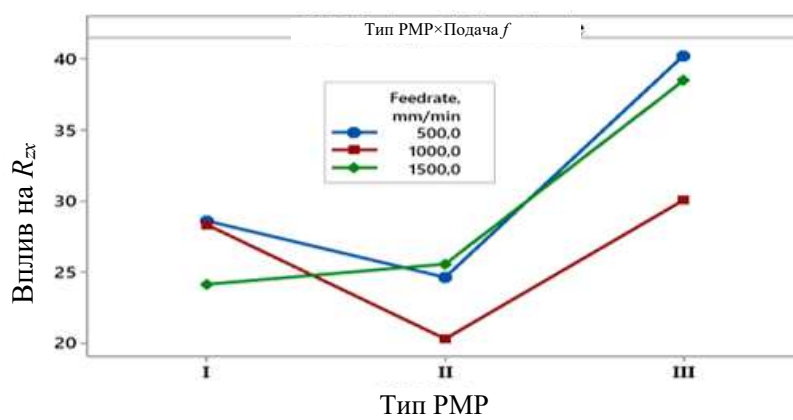
Діаграми основних ефектів показують схожий вплив предикторів – типу ЧРМР та подачі f – для трьох досліджуваних критеріїв профілю поверхні. Із рисунка 3.13, а видно, що найменша висота топографії спостерігається для РМР II типу, що є природним, оскільки для цього типу рельєфу спостерігається найменша концентрація пластично деформованих слідів на одиницю площі обробленої поверхні (рис. 3.4, б). Оскільки в інших двох типах частково регулярних рельєфів сліди деформуючого інструмента розташовані щільніше, це призводить до збільшення висоти текстури їх поверхні, і це більш виражено для рельєфу III типу. Два інші критерії – R_{ak2} та $R_{mc(25\%)}$ – змінюються аналогічним чином (рисунки 3.13, с, е), оскільки їх значення пов'язане з розподілом матеріалу за висотою текстури.

Найвища здатність до утримання мастильного матеріалу ($0,02597 \text{ мм}^2$) спостерігається для мікрорельєфів III типу РМР, згідно з ефектом, розрахованим для показника R_{ak2} , а найнижча ($0,00132 \text{ мм}^2$) – для мікрорельєфів II типу, згідно з даними таблиці 3.1. Подібна закономірність спостерігається для критерію $R_{mc(25\%)}$, де найвищі значення ($0,474$) досягаються для мікрорельєфів I та III типів.

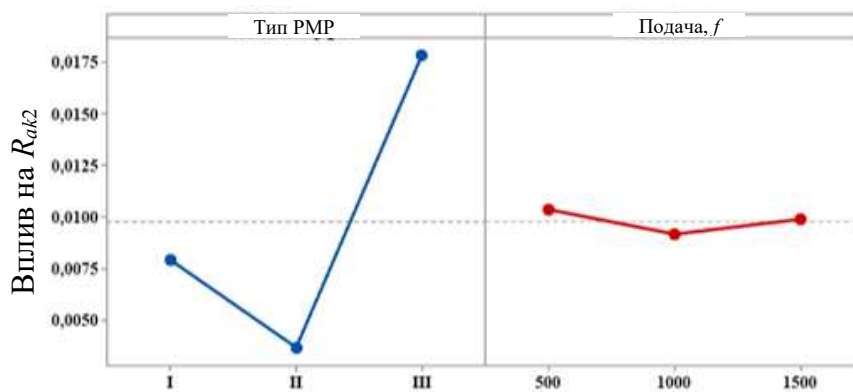
Це свідчить про те, що тип мікрорельєфу суттєво впливає на здатність поверхні утримувати мастильну масляну плівку та на відносної опорної площі поверхні.



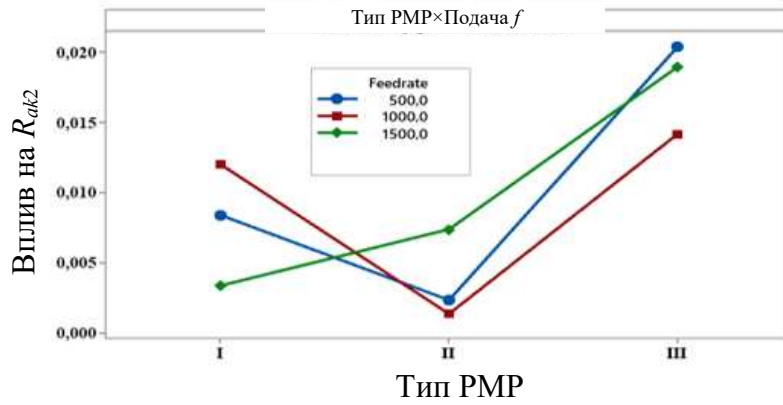
а



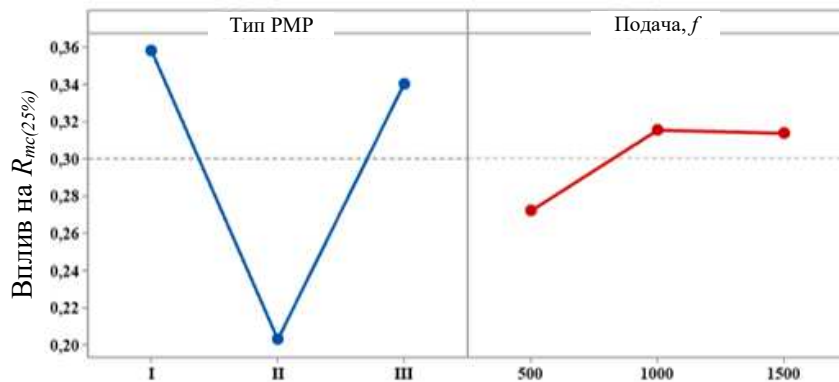
б



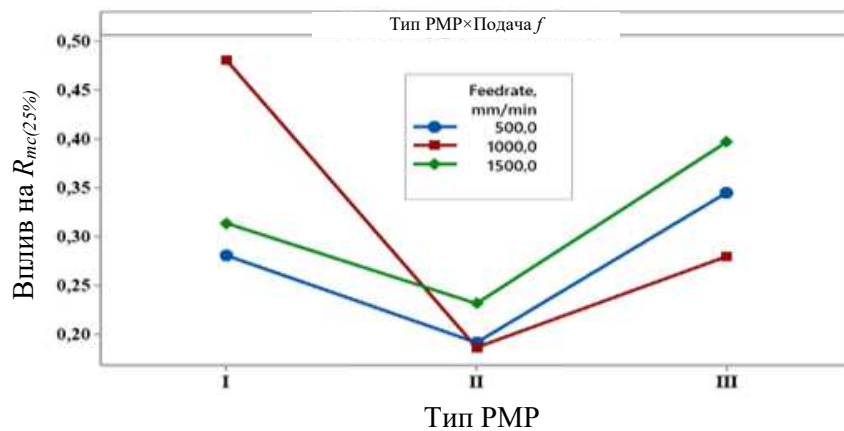
в



Г



Д



е

Рисунок 3.12. Графіки основних ефектів та взаємодій для:
 а), б) параметра R_{zx} ; в), г) параметра R_{ak2} ; д), е) параметра $R_{mc(25\%)}$.

Як видно з таблиць ANOVA (табл. 3.2–3.4 та рисунків 3.12, а–е), подача має суттєвий вплив лише на висоту нерівностей профілю поверхні, тоді як вона не впливає істотно на здатність поверхні утримувати мастило та на довжину відносну опорну площу профілю поверхні. Тому параметр подачі можна

встановлювати на максимально можливому рівні з метою забезпечення найвищої продуктивності процесу формування ЧРМР деформувальним елементом у вигляді кульки. Графіки взаємодії (рисунок 3.12) також підтверджують ці тенденції.

Слід зазначити, що даний аналіз було проведено відповідно до стандартизованих методик визначення критеріїв для оцінювання профілю поверхні, викладених у стандарті ISO 21920-2, які здебільшого стосуються характерних профілів поверхні, оброблених традиційними методами різання.

Порівнюючи виміряні профілограми та побудовані криві зношування, наведені на рис. 3.3 та рисунках 3.9 – 3.11, можна побачити, що у випадку профілю поверхонь із частково регулярними мікрорельєфами криві зношування мають іншу форму, ніж типова S-подібна, характерна для поверхонь, оброблених традиційними методами, особливо в області западин. Тому використання прямокутних трикутників для оцінювання об'єму утримування мастила для деяких поверхонь призводить до неточного наближення реальної форми кривої, як видно з рисунків 3.9, б, с та 3.11, а – в.

Відносно низькі значення коефіцієнта детермінації (R^2), отримані для регресійних моделей критеріїв R_{ak2} та $R_{mc(25\%)}$, також можна пояснити різною формою кривої зношування.

3.5 Дослідження впливу типу мікрорельєфу та режимів формування на маслоємність поверхонь з регулярним мікрорельєфом

Для побудови діаграми Аббота-Фаєрстоуна було отримано профілограми профілю поверхонь із сформованими регулярними мікрорельєфами. Напрямок руху щупу профілографа показано на рис. 3.6. Для забезпечення достовірності результатів досліджень кожен мікрорельєф було сформовано на трьох дослідних зразках із однаковими геометричними параметрами та однаковими режимами, тобто забезпечена потрібне повторювання результатів досліджень. При цьому числові значення параметрів шорсткості та профілограми було отримано на 5-ти

трасах кожного типу регулярного мікрорельєфу, сформованого із однаковими режимами.

Таблиця 3.5. Параметри шорсткості дослідних зразків із регулярними мікрорельєфами

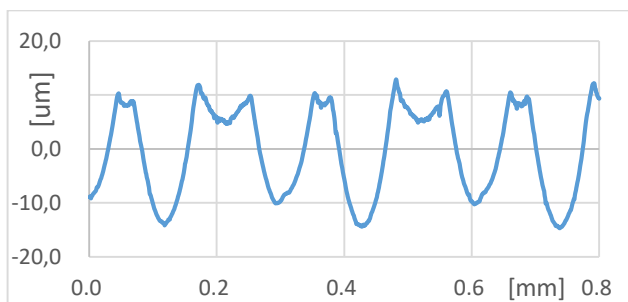
| № з/п | Тип мікрорельєфу | Зусилля деформування $F_{d,i}$ Н | Подача, $f_{in,i}$ мм/хв | Параметр шорсткості, Ra , мкм | Середнє значення параметра шорсткості, Ra , мкм |
|-------|------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|---|
| 1 | I | 400 | 500 | 8.14 | 7.502 |
| 2 | I | 400 | 500 | 7.54 | |
| 3 | I | 400 | 500 | 7.64 | |
| 4 | I | 400 | 500 | 7.27 | |
| 5 | I | 400 | 500 | 7.26 | |
| 6 | I | 400 | 1000 | 8.86 | 8.137 |
| 7 | I | 400 | 1000 | 7.36 | |
| 8 | I | 400 | 1000 | 6.73 | |
| 9 | I | 400 | 1000 | 8.52 | |
| 10 | I | 400 | 1000 | 8.52 | |
| 11 | I | 400 | 1500 | 7.49 | 6.886 |
| 12 | I | 400 | 1500 | 7,64 | |
| 13 | I | 400 | 1500 | 5,10 | |
| 14 | I | 400 | 1500 | 5,10 | |
| 15 | I | 400 | 1500 | 8,44 | |
| 16 | II | 400 | 500 | 6.74 | 6.069 |
| 17 | II | 400 | 500 | 7.37 | |
| 18 | II | 400 | 500 | 3.61 | |
| 19 | II | 400 | 500 | 4.22 | |

| | | | | | |
|----|-----|-----|------|-------|--------|
| 20 | II | 400 | 500 | 8.26 | |
| 21 | II | 400 | 1000 | 7.41 | 5.797 |
| 22 | II | 400 | 1000 | 3.31 | |
| 23 | II | 400 | 1000 | 5.60 | |
| 24 | II | 400 | 1000 | 4.92 | |
| 25 | II | 400 | 1000 | 7.57 | |
| 26 | II | 400 | 1500 | 7.87 | 5.372 |
| 27 | II | 400 | 1500 | 7.24 | |
| 28 | II | 400 | 1500 | 7.67 | |
| 29 | II | 400 | 1500 | 3.76 | |
| 30 | II | 400 | 1500 | 4.15 | |
| 31 | III | 400 | 500 | 11.33 | 11.360 |
| 32 | III | 400 | 500 | 11.21 | |
| 33 | III | 400 | 500 | 13.42 | |
| 34 | III | 400 | 500 | 10.66 | |
| 35 | III | 400 | 500 | 10.50 | |
| 36 | III | 400 | 1000 | 9.41 | 8.61 |
| 37 | III | 400 | 1000 | 8.12 | |
| 38 | III | 400 | 1000 | 6.60 | |
| 39 | III | 400 | 1000 | 11.01 | |
| 40 | III | 400 | 1000 | 8.29 | |
| 41 | III | 400 | 1500 | 10.73 | 10.478 |
| 42 | III | 400 | 1500 | 9.46 | |
| 43 | III | 400 | 1500 | 10.79 | |
| 44 | III | 400 | 1500 | 8.61 | |
| 45 | III | 400 | 1500 | 11.98 | |

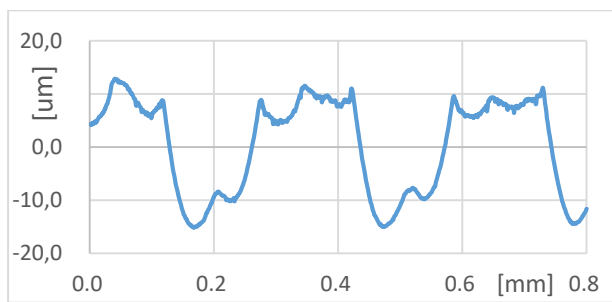
Для визначення впливу регулярного мікрорельєфу на експлуатаційні властивості поверхні було отримано дослідні зразки без регулярного

мікрорельєфу і отримано з них профілограми. Зусилля деформування при формуванні регулярного мікрорельєфу становило 400Н.

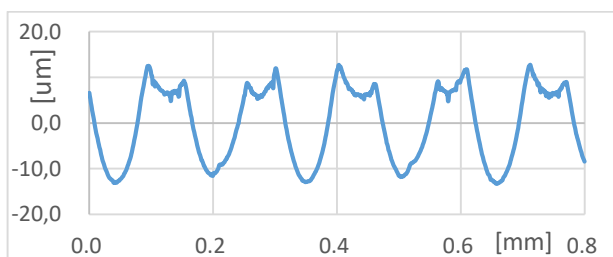
Для спрощення опрацювання результатів експериментальних досліджень запропоновано отримати середнє значення параметра шорсткості і після цього будувати діаграму зношування для тієї профілограми, числове значення шорсткості якої буде найближчим до визначеного середнього.



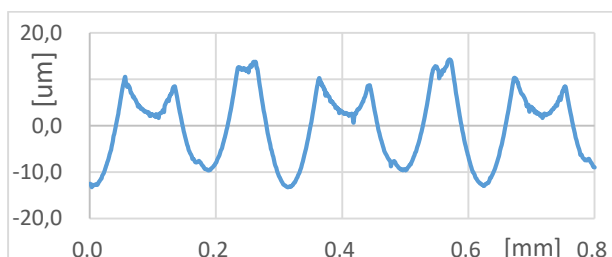
а) Ra=7.54



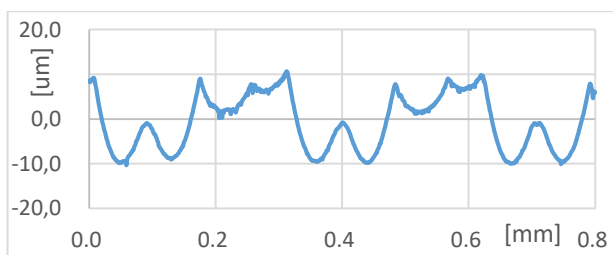
б) Ra=8.52



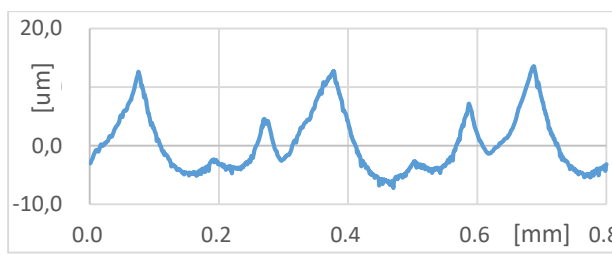
в) Ra=7.49



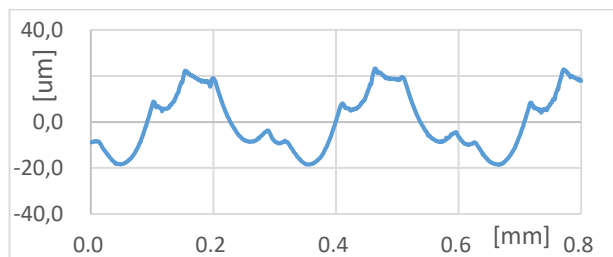
г) Ra=6.74



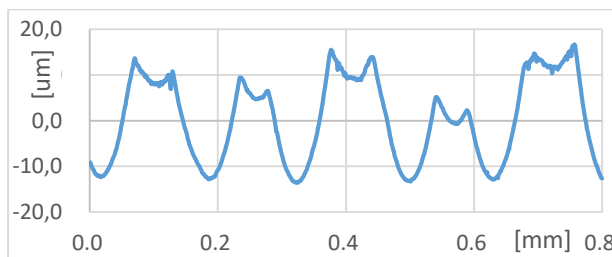
д) Ra=5.60



е) Ra=4.15



є) Ra=11.33



ж) Ra=8.29

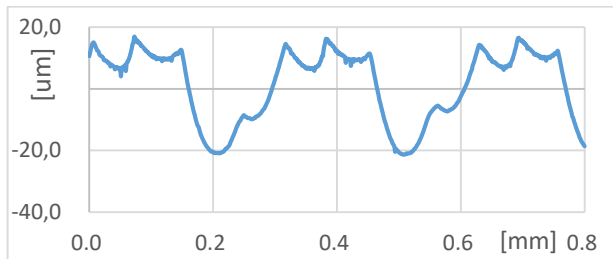


Рисунок 3.13. Профілограми поверхонь із регулярними мікрорельєфами, числові значення параметра R_a яких найбільше наближені до середніх значень параметра шорсткості табл.1.

i) $R_a=10.73$

Середнє значення шорсткості поверхні запропоновано визначати за допомогою методики описаної в роботі [14], використовуючи теорію малої вибірки, а також попередній аналіз даних вибірки на статистичну однорідність за критерієм Гребса. Такий підхід при аналізі експериментальних даних забезпечить достовірність отриманих результатів досліджень.

Отримані в результаті розрахунків дані внесено в останню колонку таблиці 1.

Для кожної із дев'яти обраних значень параметра шорсткості за їх профілограмами (рис. 3.13) здійснено побудову діаграм Аббота-Фаєрстоуна (рис. 3.14). Усі побудовані профілограми наведено в додатку 9 до роботи.

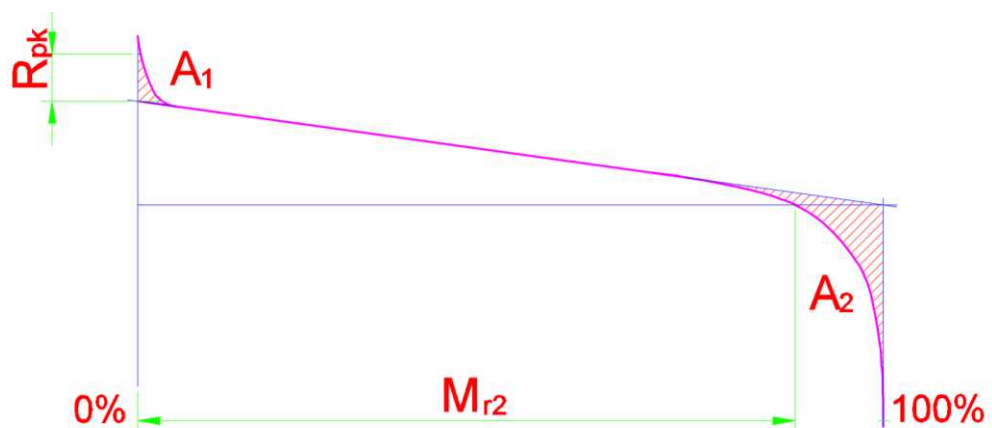


Рисунок 3.14. Загальний вигляді діаграми Аббота-Фаєрстоуна

З огляду на великий обсяг графічного матеріалу наведемо лише числові значення параметрів діаграми, необхідних для розрахунку обсягу утримуваного мастила.

Standard ISO 13565-2:1996. (1996) забезпечує залежність для визначення кількості мастила, яка буде утримуватися на поверхні.

$$V_o = \frac{R_{vk}(100 - M_{r2})}{200}. \quad (3.7)$$

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

Розрахуємо об'єм мастила, який буде утримуватись на поверхні із сформованим регулярним мікрорельєфом використовуючи значення отримані із профілограм (рис. 3.13). Такий аналіз проводиться для поверхонь із сформованим регулярним мікрорельєфом, однак які не були в експлуатації.

Таблиця 3.6. Значення параметрів для визначення експлуатаційних характеристик поверхонь з нанесеним на них частково регулярним мікрорельєфом

| Позн. | Тип мікрорельєфу | Параметр шорсткості R_a , мкм | Параметри групи R_k для побудови кривої Аббота-Фастерстоуна | | Розрахункова маслоємність поверхні, V_o , $\text{мм}^3/\text{см}^2$ |
|-------|------------------|---------------------------------|---|----------|---|
| | | | R_{vk} | M_{r2} | |
| а | I | 7.54 | 0.0552 | 50.632 | 0.0136 |
| б | I | 8.52 | 0.0539 | 55.601 | 0.0119 |
| в | I | 7.49 | 0.0703 | 52.230 | 0.0168 |
| г | II | 6.74 | 0.0841 | 66.643 | 0.0140 |
| д | II | 5.60 | 0.0588 | 48.852 | 0.0150 |
| е | II | 4.15 | 0.0785 | 96.670 | 0.0013 |
| є | III | 11.33 | 0.0978 | 75.074 | 0.0122 |
| ж | III | 8.29 | 0.0928 | 70.075 | 0.0115 |
| і | III | 10.73 | 0.0485 | 56.391 | 0.0105 |

Отримавши значення обсягу утримуваного на поверхні мастила можемо зробити висновок про те, що тип мікрорельєфу не чинить суттєвого впливу на обсяг утримуваного мастила, окрім значень отриманих при подачі 1500 мм/хв, де це значення становить $V_o = 0.0013 \text{ мм}^3/\text{см}^2$. Для інших типів мікрорельєфів значення обсягу мастила коливається в межах $V_o = 0.0105 - 0.0168 \text{ мм}^3/\text{см}^2$. Також підтверджується гіпотеза про те, що шорсткості поверхні як характеристика її якості не має залежності із обсягом утримуваного мастила. При цьому більший вплив чинять режими формування регулярного мікрорельєфу, зокрема швидкість подачі.

3.6. Висновки до розділу 3

Узагальнюючи отримані результати експериментального дослідження, можна зробити такі висновки:

1. Частково регулярні мікрорельєфи (ЧРМР), незалежно від їх типу, демонструють приблизно у 10 разів вищу здатність утримувати мастило (маслоємність) порівняно з поверхнями, які не мають сформованого мікрорельєфу із пластично деформованими канавками. Водночас ця особливість знижує їх несучу здатність. Тому під час проектування параметрів технологічних операцій обкатування деформувальним інструментом у вигляді кульки необхідно враховувати як необхідну маслоємність так і несучу здатність сформованої поверхні.

2. Серед різних типів досліджених ЧРМР I та III типи демонструють кращу комбінацію функціональних властивостей, ніж II тип ЧРМР, який показав найнижчі результати за параметрами шорсткості поверхні та малоємністю поверхні. Тому подальші дослідження мають бути зосереджені переважно на цих двох типах ЧРМР.

3. Проведено дослідження впливу типу мікрорельєфу та режимів його формування на здатність поверхонь утримувати мастило. Встановлено, що тип мікрорельєфу практично не чинить суттєвого впливу на обсяг утримуваного

мастила, окрім значень отриманих при подачі 1500 мм/хв, де це значення становить $V_o = 0.0013 \text{ мм}^3/\text{см}^2$. Для інших типів мікрорельєфів значення обсягу мастила коливається в межах $V_o = 0.0105 - 0.0168 \text{ мм}^3/\text{см}^2$. Також підтверджується гіпотеза про те, що шорсткості поверхні як характеристика її якості не має залежності із обсягом утримуваного мастила. Аналіз профілю, що забезпечує максимальну маслоємність поверхні вказує на те, що це гостровершинний профіль і він характеризується меншою здатністю поверхні до зношування, хоча і володіє максимальною маслоємністю. Тому характеристика поверхні лише за параметром маслоємності не може було однозначною для визначення експлуатаційних властивостей поверхні.

4. Стандартизована методика розрахунку площі канавок та критерію R_{ak2} , наведена в стандарті EN ISO 21920-2, є недостатньо придатною для частково регулярних ЧРМР через відмінності у формах діаграм зношування (кривих Аббота-Фаєрстоуна). Як видно з емпірично побудованих діаграм зношування для ЧРМР (рисунок 4.3, а–с), існує додаткова площа, яка не враховується при визначенні параметра R_{ak2} , а отже функціональний параметр, що характеризує здатність ЧРМР утримувати мастило, занижений. Це дає підстави для подальших досліджень інших методів визначення критерію R_{ak2} з метою врахування цієї додаткової невикористаної площі діаграми зношування.

5. Як видно з таблиць табл. 3.2–3.4 та рисунків 3.12, а–е, подача має суттєвий вплив лише на висоту нерівностей профілю поверхні, тоді як вона істотно не впливає на здатність поверхні утримувати мастило та на відносну опорну довжину профілю поверхні. Тому параметр подачі можна встановлювати на максимально можливому рівні з метою забезпечення найвищої продуктивності процесу формування ЧРМР деформувальним елементом у вигляді кульки. Графіки взаємодії (рисунок 3.12) також підтверджують ці тенденції.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ ТА МІКРОСТРУКТУРИ ПОВЕРХОНЬ З ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНИМИ РЕЛЬЄФАМИ

4.1 Передумови проведення дослідження мікротвердості поверхонь з частково регулярними мікрорельєфами

При виготовленні дослідних зразків із різними типами регулярних мікрорельєфів було проведено спостереження, що структура поверхні в околі канавки у місцях пластичного деформування відрізняється від початкового матеріалу. Це породило припущення, що фізико-механічні властивості поверхонь з регулярними мікрорельєфами є неоднорідними і розподіляються по поверхні з ЧРМР в залежності від розміщення самих канавок мікрорельєфу. Тому було вирішено провести дослідження мікротвердості поверхневого шару поверхонь з різними типами мікрорельєфів та дослідити їх структуру.

Відповідно до основної мети цього дослідження, було досліджено три типи регулярних рельєфів (ЧРМР), отриманих шляхом обкатування деформувальним елементом у вигляді кульки верхньої поверхні призматичної пластини, виготовленої з холоднокатаного листа нержавіючої сталі AISI 304L. Типи ЧРМР відрізняються способом формування пластично деформованих слідів на поверхні зразка (рис. 4.1, а–в). Залежно від цього їх можна класифікувати наступним чином:

- а) мікрорельєф зі канавками, що не торкаються один одного (тип I),
- б) мікрорельєф зі канавками, що торкаються один одного (тип II),
- с) мікрорельєф зі канавками, що перетинаються між собою (тип III),

Три типи ЧРМР з трьома різними подачами були сформовані на одній пластині за допомогою фрезерного верстата з ЧПК HAAS TM-1 та спеціально розробленого деформуючого інструмента [65] (рис. 3.8). Після цього пластину було розрізано на зразки меншого розміру з габаритами $30 \times 40 \times 4$ мм за допомогою волоконно-лазерного верстата з ЧПК типу GN NCF 3015 (рис. 4.1, в).

Для дослідження використовувалася холоднокатана пластина з аустенітної нержавіючої сталі марки AISI 304 товщиною 4 мм, яка має механічні характеристики, наведені в таблиці 4.1, згідно з сертифікатом, виданим виробником листів. Хімічний склад матеріалу було визначено за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізатора Bruker Corp., США, модель S1 Sorter. Отриманий хімічний склад у масових відсотках наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.1. Механічні властивості аустенітної холоднокатаної нержавіючої сталі AISI 304.

| Механічні властивості | | | | |
|-----------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|----------|
| Матеріал | Межа пластичності, | Гранична міцність на розтяг, МПа | Відносне видовження | |
| AISI 304 | 372 ± 10 | 710 ± 12 | 31.2 ± 0.8 | 205 ± 12 |

Таблиця 4.2. Хімічний склад аустенітної холоднокатаної нержавіючої сталі AISI 304

| Матеріал | Cr | Mn | Mo | Ni | Si | Fe |
|----------|-------|------|------|------|------|-------|
| AISI 304 | 18.23 | 1,76 | 0.27 | 8.33 | 0,38 | 71,03 |

Щоб зберегти поверхню з ЧРМР під час розрізання зразків для металографічних шліфів, на верхню поверхню зразків було нанесено тонке мідне покриття за технологією «щіткового гальванування». Нанесення покриття виконується наступним чином: зразок закріплюється в тримачі, який під'єднаний до негативного полюса джерела живлення. Графітовий електрод, обгорнутий текстильною опліткою, підключається до позитивного полюса. При ввімкненому

джерелі струму електрод занурюється у відповідний розчин і за допомогою швидких рухів наносить покриття на локальну ділянку поверхні зразка.

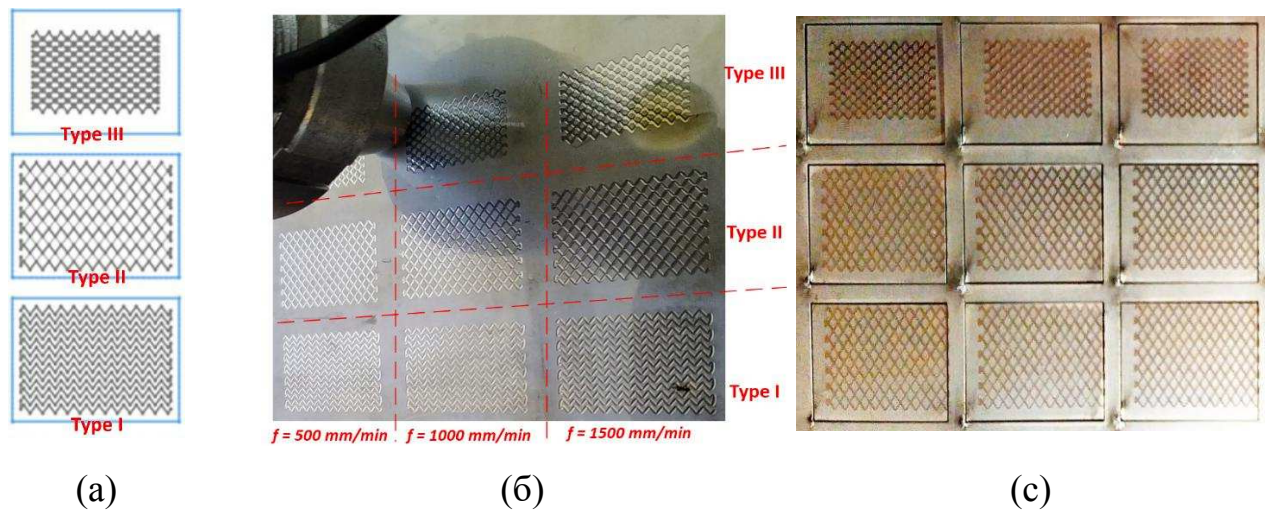


Рисунок 4.1. Схема трьох типів частково регулярних рельєфів (а); формування ЧРМР на верхній поверхні пластини за допомогою процесу кульового обкатування (б); вирізані менші зразки з пластини для вимірювання мікротвердості та аналізу структури (в)

Одна з бічних поверхонь зрізів, які проходять перпендикулярно до слідів деформування (канавки), додатково обробляється механічно за допомогою металографічного шліфувального та полірувального верстата типу MoPaо 260E (Opassy Industry Group Co., Ltd., Dongguan, Китай) з метою виготовлення придатних зразків для металографічного аналізу та вимірювання мікротвердості, а також для видалення шару матеріалу, зміненого після операції лазерного різання. Вирізані менші металографічні зразки спочатку піддаються термозатвердненому пластифікаційному пресуванню за допомогою установки для заливання металографічних зразків XQ-2B, після чого – додатковому поліруванню до необхідної гладкості поверхні для вимірювання мікротвердості. Для подальшого аналізу мікроструктури поперечні шліфи протравлюються реактивом, придатним для аустенітної сталі, який складається з суміші концентрованої азотної кислоти (HNO_3) та концентрованої хлористоводневої кислоти (HCl) у співвідношенні об'ємів 1:3.

4.2. Початкова мікроструктура та вимірювання мікротвердості поверхні з ЧРМР

Для підготовки обґрунтованого експериментального плану було проведено попередні вимірювання мікроструктури та мікротвердості зразків, які мають частково регулярний мікрорельєф I типу.

Мікротвердість деформованої структури вимірювали методом Віккерса при навантаженні 50 г згідно з ISO 6507-1. Для вимірювання використовували цифровий мікротвердомір HVS-1000 (Opassy Industry Group Co., Ltd., Dongguan, Китай).

Вимірювання мікротвердості в глибину поверхневого шару та вздовж перерізу сліду ПРР показані на рис. 4.2, а, а діаграми зміни мікротвердості наведені на рис. 4.2, б, в.

Вимірювання мікротвердості, проведені дуже близько до рівня поверхні, знаходяться в діапазоні 340–380 $HV_{0.05}$, і лише один відбиток перевищує значення 380 $HV_{0.05}$, що може бути зумовлено локальними структурними коливаннями через ділянку мартенситу, індукованого деформацією (рис. 4.2б). Не спостерігається тенденції до зростання значень при переході від гребеня до дна канавки.

Нижчі сліди від втискання свідчать про зміну значень мікротвердості в глибину. Узагальнений графік на рис. 4.2в показує різке зниження значень до глибини близько 500 мкм, подібне для обох слідів. Глибше слід у зоні дна перевищує слід у зоні гребеня, досягаючи значення мікротвердості 225 $HV_{0.05}$. Цей слід досягає мікротвердості сталі 215 $HV_{0.05}$ на глибині понад 1000 мкм.

Узагальнюючи, можна зазначити, що хоча твердість поблизу поверхні обох слідів є подібною, спостерігається різниця між виміряною мікротвердістю біля дна слідів і біля виступів канавки у межах 30–50 $HV_{0.05}$. Це підтверджує характер розподілу ступеня пластичної деформації під час фінішної обробки методом втискання деформувального елемента у вигляді кульки у класичному його застосуванні (тобто для згладжування поверхні) [66].

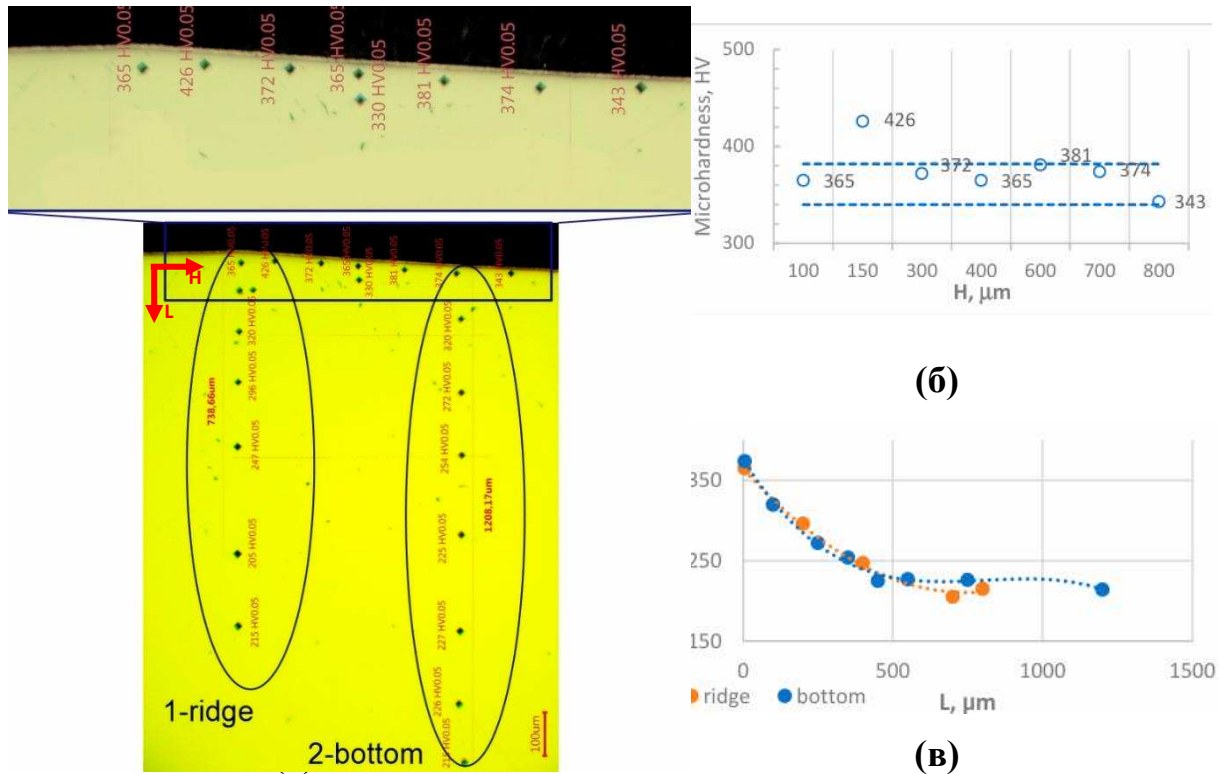


Рисунок 4.2. (а) Поперечний переріз вимірної мікротвердості для ЧРМР І типу; (б) Діаграми зміни мікротвердості в глибину матеріалу під виступом канавки (1) та його дном (2); (в) Діаграма зміни мікротвердості вздовж перерізу канавки.

4.3. Планування експериментальних досліджень

Операції формування ЧРМР обкатуванням деформувальним елементом у вигляді кульки виконуються при трьох різних подачах інструмента: $f=500, 1000$ та 1500 мм/хв для кожного з трьох типів часткових регулярних рельєфів (ЧРМР). Таким чином, основними факторами цього експериментального дослідження є три типи мікрорельєфів і три значення подачі під час формування ЧРМР. Деформуюча сила F , Н залишається сталою для всіх сформованих ЧРМР і становить 400 Н.

Після формування ЧРМР дослідні зразки готуються згідно з описом у підрозділі 4.2. Вимірювання мікротвердості здійснюється у двох основних зонах: поблизу верхньої частини гребенів пластично деформованих канавок (зона 1) та поблизу їхніх основ (зона 2) (рис. 4.3, а).

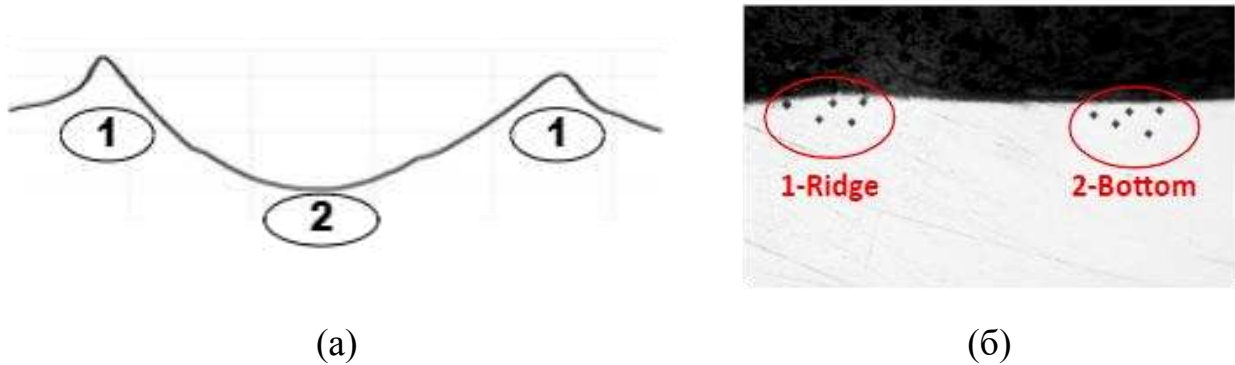


Рисунок 4.3. Схема зон вимірювання поперечних перерізів канавки ЧРМР (а); зображення вимірювань мікротвердості на гребенях $HV_{0.01}^R$ (зона 1) і у западинах $HV_{0.01}^B$ (зона 2) ЧРМР для типів мікрорельєфу I- III (б)

Оскільки повторення вимірювань мікротвердості за шкалою Віккерса не повинні бути занадто близько одне до одного, щоб уникнути взаємного впливу, а зона вимірювань у ділянці гребенів є відносно вузькою, прикладене зусилля індентора вимірювального пристрою було обрано на рівні 10 г замість 50 г.

Отже, вихідними параметрами експериментального дослідження є $HV_{0.01}^R$ та $HV_{0.01}^B$. Для компенсації впливу мікроструктури на значення твердості та так званого «ефекту розміру відбитка» [51] при малих навантаженнях, вимірювання виконуються п'ять разів для кожної комбінації рівнів факторів плану експерименту, щоб отримати більш достовірні результати для $HV_{0.01}^R$ та $HV_{0.01}^B$. План експерименту та отримані результати вимірювання твердості наведено в таблиці 4.3.

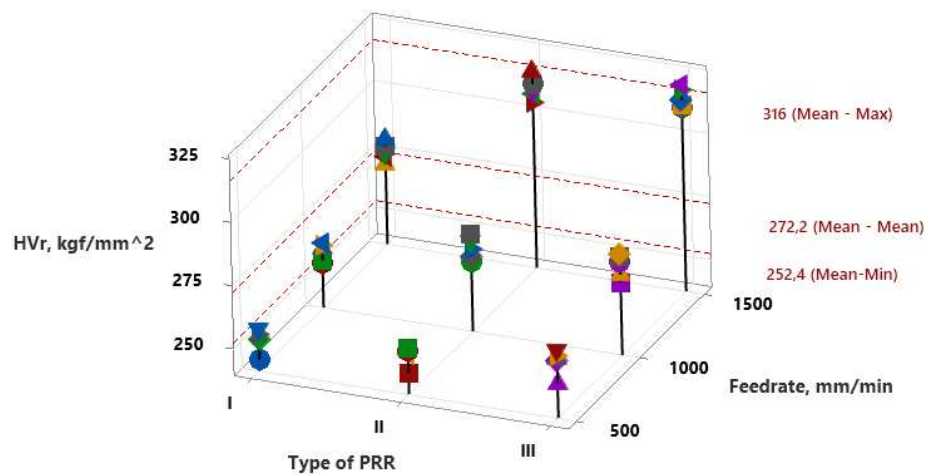
Таблиця 4.3. Планування та результати експериментальних досліджень заміру мікротвердості $HV_{0.01}^R$ і $HV_{0.01}^B$

| № | Тип РМР | Подача, $f_{in.i.}$ [мм/хв] | $HV_{0.01}^R$, [кгс/мм ²] | $HV_{0.01}^R$, [кгс/мм ²] | $HV_{0.01}^B$, [кгс/мм ²] | $HV_{0.01}^B$, [кгс/мм ²] |
|----|---------|--------------------------------|---|---|---|---|
| 1 | I | 500 | 244 | 252,4 | 289 | 285,8 |
| 2 | I | 500 | 256 | | 279 | |
| 3 | I | 500 | 254 | | 285 | |
| 4 | I | 500 | 256 | | 291 | |
| 5 | I | 500 | 252 | | 285 | |
| 6 | I | 1000 | 265 | 261,4 | 311 | 311,4 |
| 7 | I | 1000 | 263 | | 312 | |
| 8 | I | 1000 | 257 | | 308 | |
| 9 | I | 1000 | 258 | | 315 | |
| 10 | I | 1000 | 264 | | 311 | |
| 11 | I | 1500 | 278 | 275,8 | 319 | 324,6 |
| 12 | I | 1500 | 281 | | 326 | |
| 13 | I | 1500 | 274 | | 329 | |
| 14 | I | 1500 | 271 | | 326 | |
| 15 | I | 1500 | 275 | | 323 | |
| 16 | II | 500 | 248 | 255,2 | 292 | 291 |
| 17 | II | 500 | 258 | | 286 | |
| 18 | II | 500 | 257 | | 291 | |
| 19 | II | 500 | 258 | | 292 | |
| 20 | II | 500 | 255 | | 294 | |
| 21 | II | 1000 | 278 | 272,2 | 324 | 327,2 |
| 22 | II | 1000 | 275 | | 328 | |
| 23 | II | 1000 | 272 | | 330 | |
| 24 | II | 1000 | 267 | | 325 | |
| 25 | II | 1000 | 269 | | 329 | |

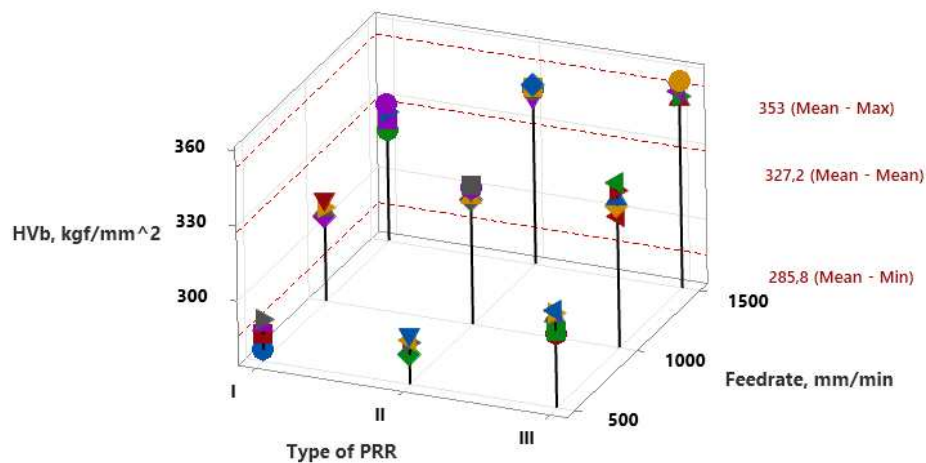
| № | Тип РМР | Подача, $f_{in.i}$ [мм/хв] | $HV_{0.01}^R$, [кгс/мм ²] | $HV_{0.01}^R$, [кгс/мм ²] | $HV_{0.01}^B$, [кгс/мм ²] | $HV_{0.01}^B$, [кгс/мм ²] |
|----|---------|-------------------------------|---|---|---|---|
| 26 | II | 1500 | 312 | 310,2 | 341 | 343,4 |
| 27 | II | 1500 | 317 | | 341 | |
| 28 | II | 1500 | 309 | | 345 | |
| 29 | II | 1500 | 305 | | 344 | |
| 30 | II | 1500 | 308 | | 346 | |
| 31 | III | 500 | 253 | 261,6 | 312 | 309 |
| 32 | III | 500 | 266 | | 313 | |
| 33 | III | 500 | 262 | | 304 | |
| 34 | III | 500 | 264 | | 305 | |
| 35 | III | 500 | 263 | | 311 | |
| 36 | III | 1000 | 268 | 274,4 | 334 | 333,8 |
| 37 | III | 1000 | 278 | | 340 | |
| 38 | III | 1000 | 276 | | 337 | |
| 39 | III | 1000 | 271 | | 327 | |
| 40 | III | 1000 | 279 | | 331 | |
| 41 | III | 1500 | 315 | 316 | 350 | 353 |
| 42 | III | 1500 | 321 | | 357 | |
| 43 | III | 1500 | 312 | | 354 | |
| 44 | III | 1500 | 319 | | 351 | |
| 45 | III | 1500 | 313 | | 353 | |

4.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень

Відповідно до сучасних уявлень про процеси деформування, застосування ЧРМР викликало локалізовані пластичні деформації на поверхні пластини з аустенітної нержавіючої сталі марки AISI 304. З фізичної точки зору, процес пластичної деформації призвів до накопичення об'ємних пошкоджень у приповерхневому шарі, де в мікроструктуру сталі були внесені дефекти та пошкодження. Було встановлено, що для всіх досліджуваних типів ЧРМР збільшення подачі, а отже й швидкості деформації, призводить до зміцнення матеріалу на мікрорівні (рис.4.4).



(a)



(б)

Рисунок 4.4. 3D діаграми розсіювання та трендів, що візуалізують зміну значень твердості HV відповідно до даних з таблиці 4.3, у таких зонах:

а) в зоні напливів канавки ЧРМР; б) в зоні дна канавки ЧРМР

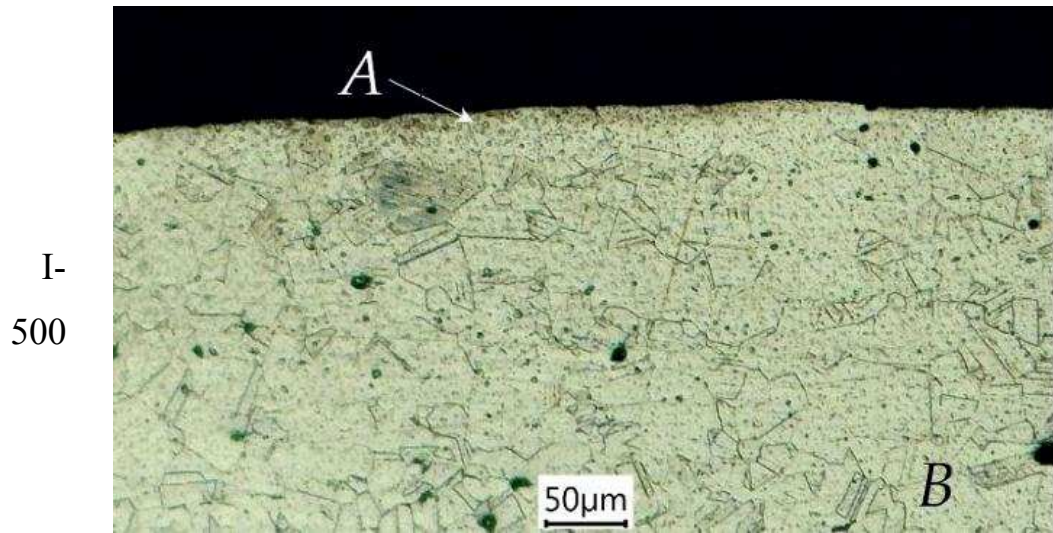
Це підтверджується зростанням значень мікротвердості $HV_{0.01}^R$ та $HV_{0.01}^B$, як показано в таблиці 4.3 та на тривимірних діаграмах розсіювання на рис. 4.4 а, б. З них видно, що відбулося загальне підвищення твердості поверхні порівняно з початковою твердістю матеріалу $HV_{0.01} = 205$ (див. табл. 4.1).

4.5. Аналіз мікроструктури деформованого поверхневого шару

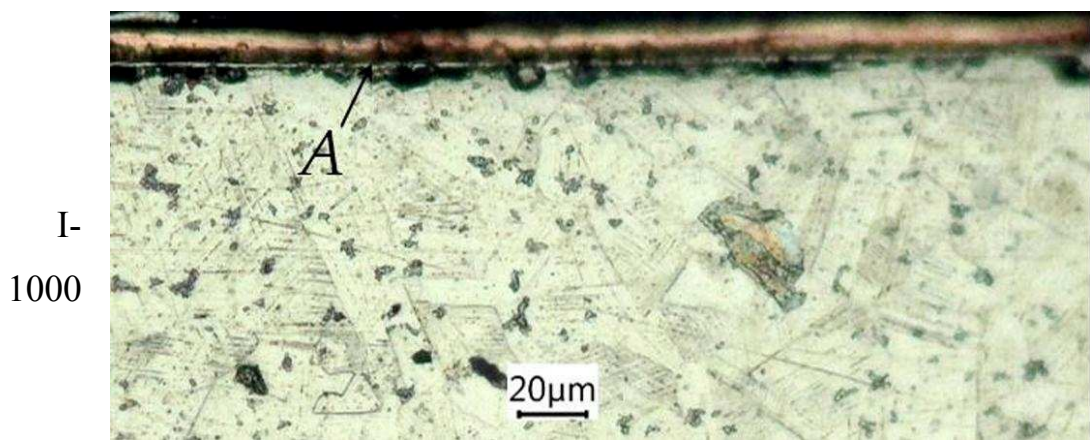
Мікроструктура сталі в початковому стані переважно складається з зерен аустеніту з окремими ділянками мартенситу, індукованого деформацією внаслідок прокатки. Під час формування регулярного мікрорельєфу дно канавки залишається гладким, без макро- та мікродефектів. Сліди руху деформувального інструмента є рівномірними, що свідчить про стабільність деформаційного впливу на матеріал. У нижній частині мастильної канавки формується сильно деформована мікроструктура, яка характеризується високою густиною дислокацій [18].

Здатність до зміцнення аустенітної сталі вища, ніж у сталей інших класів, що відображається у чітко вираженому шарі пластично деформованого металу. Цей шар ледве помітний при подачі $f_{in.i} = 500$ мм/хв, чітко виражений при $f_{in.i} = 1000$ мм/хв і має явні межі з основним металом при $f_{in.i} = 1000$ мм/хв. Він формується шляхом подрібнення зерен аустеніту на дрібніші елементи з подальшою аморфізацією поверхневого шару, що робить окремі зерна невідмінними та супроводжується утворенням деформаційного мартенситу.

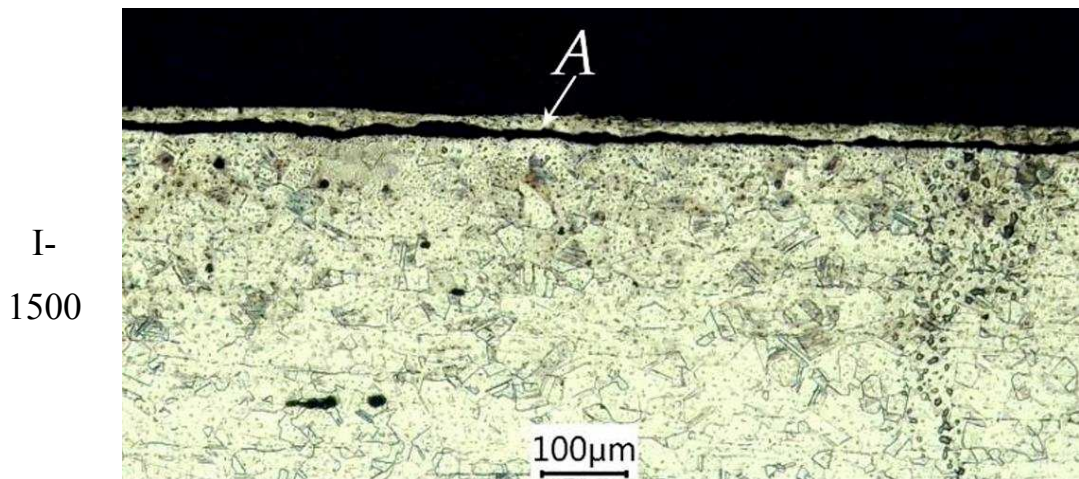
Підповерхневі шари формуються внаслідок пластичної деформації та зміщення зерен аустеніту (рис. 4.5). Видно лінії деформації та ділянки, що перетворилися на мартенсит, сформований деформацією. Це відбувається тому, що профіль канавки утворюється шляхом пластичного вдавлювання металу як у напрямку вперед, так і вбік. За межами деформованої поверхні мікроструктура залишається майже незмінною.



(a)



(б)



(в)

Рисунок 4.5. Оптичні мікрофотографії мікроструктур аустенітної нержавіючої сталі (марки AISI 304), отримані при різних значеннях подачі, [мм/хв]: (а) 500; (б) 1000; (в) 1500 для рельєфу I типу.

Зі збільшенням подачі спостерігалось зростання глибини деформації. Максимальна мікротвердість за досліджених умов обробки була подібною й коливалася в межах від 314 до 377 $HV_{0.05}$, що свідчить про максимальне зміцнення матеріалу за заданих температурно-силових умов обробки.

4.6. Одержані регресійні моделі та їхній статистичний аналіз

Отже, встановлено, що інтенсивність зростання мікротвердості в зоні формування ЧРМР залежить від:

- типу та параметрів деформуючого інструмента, в нашому випадку кульки,
- сили втискання деформувального елемента у вигляді кульки,
- подачі інструменту з деформувальним елементом.

Тому структурна та параметрична оптимізація існуючих технологічних режимів, а також розробка нових для формування ЧРМР є надзвичайно важливою.

Результати для $HV_{0.01}^R$ та $HV_{0.01}^B$, наведені в таблиці 4.1, використовуються для аналізу впливу типу ЧРМР та подачі як факторів операції кулькового накочування на основі отриманих регресійних рівнянь і проведеного статистичного аналізу за допомогою програмного забезпечення Minitab (Minitab, LLC, State College, PA, USA) [45], є наступними.

4.6.1 Вплив факторів на мікротвердість, отриману в зоні виступів канавок ЧРМР

Отримані коефіцієнти основних ефектів та взаємодій, а також повне рівняння регресії, яке стосується впливу різних типів ЧРМР і подачі на мікротвердість у зоні виступів $HV_{0.01}^R$:

$$\begin{aligned}
HV_{0.01}^R(PRR, f) = & 275.467 - 12.267 \cdot PRR_I + 3.733 \cdot PRR_{II} + 8.533 \cdot PRR_{III} - \\
& -19.067 \cdot f_{500} - 6.133 \cdot f_{1000} + 25.200 \cdot f_{1500} + 8.270 \cdot PRR_I \cdot f_{500} + 4.330 \cdot PRR_I \cdot f_{1000} - \\
& -12.600 \cdot PRR_I \cdot f_{1500} - 4.930 \cdot PRR_{II} \cdot f_{500} - 0.870 \cdot PRR_{II} \cdot f_{1000} + 5.800 \cdot PRR_{II} \cdot f_{1500} - \\
& - 3.330 \cdot PRR_{III} \cdot f_{500} - 3.470 \cdot PRR_{III} \cdot f_{1000} + 6.800 \cdot PRR_{III} \cdot f_{1500}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Статистична оцінка рівняння регресії (4.1) показує стандартне відхилення $\sigma = 4.391$ і коефіцієнт детермінації $R^2 = 96,8\%$, що свідчить про дуже добру відповідність моделі експериментальним результатам. Для оцінки статистичної значущості предикторів регресії за допомогою теореми нульової гіпотези H_0 було проведено дисперсійний аналіз (ANOVA). Його результати наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) регресійної моделі (4.1).

| Джерело | | | Відсоток впливу | | | F-параметр | P-параметр |
|---------------------|----|---------|-----------------|---------|---------|------------|------------|
| Модель | 8 | 20971.2 | 96.80% | 20971.2 | 2621.40 | 135.98 | 0.000 |
| Тип ЧРМР | 2 | 3558.4 | 16.42% | 3558.4 | 1779.20 | 92.29 | 0.000 |
| Подача, f | 2 | 15542.9 | 71.74% | 15542.9 | 7771.47 | 403.13 | 0.000 |
| Тип ЧРМР*подача f | 4 | 1869.9 | 8.63% | 1869.9 | 467.47 | 24.25 | 0.000 |
| Похибки | 36 | 694.0 | 3.20% | 694.0 | 19.28 | | |
| Всього | 44 | 21665.2 | 100.00% | | | | |

Як видно з таблиці 4.4, усі предиктори та взаємодія між ними в регресійній моделі (4.1) є статистично значущими завдяки близьким до нуля значенням P , що означає відхилення нульової гіпотези для кожного з них. Враховуючи

відсотковий внесок (таблицю 4.4), найбільший вплив на параметр $HV_{0.01}^R$ має подача (71,74%), далі йде тип PRR (16,42%) і взаємодія між ними (8,63%).

Повне рівняння регресії, яке описує вплив типів частково регулярного мікрорельєфу та подачі на мікротвердість у заглибленнях $HV_{0.01}^B$, має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 HV_{0.01}^B(PRR, f) = & 319.911 - 12.644 \cdot PRR_I + 0.622 \cdot PRR_{II} + 12.022 \cdot PRR_{III} - 24.644 \cdot f_{500} \\
 & + 4.222 \cdot f_{1000} + 20.422 \cdot f_{1500} + \\
 & + 3.180 \cdot PRR_I \cdot f_{500} - 0.090 \cdot PRR_I \cdot f_{1000} - 3.090 \cdot PRR_I \cdot f_{1500} - 4.890 \cdot PRR_{II} \cdot f_{500} + \\
 & 2.440 \cdot PRR_{II} \cdot f_{1000} + \\
 & + 2.440 \cdot PRR_{II} \cdot f_{1500} + 1.710 \cdot PRR_{III} \cdot f_{500} - 2.360 \cdot PRR_{III} \cdot f_{1000} + 0.640 \cdot PRR_{III} \cdot f_{1500}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Регресійне рівняння (4.2) має стандартне відхилення $\sigma = 3.551$ та коефіцієнт детермінації $R^2 = 97.84\%$, що свідчить про дуже хорошу відповідність моделі експериментально отриманим результатам. Для оцінювання статистичної значущості регресійних предикторів за допомогою теореми нульової гіпотези проведено дисперсійний аналіз (ANOVA), результати якого наведено в Таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) регресійної моделі (4.2).

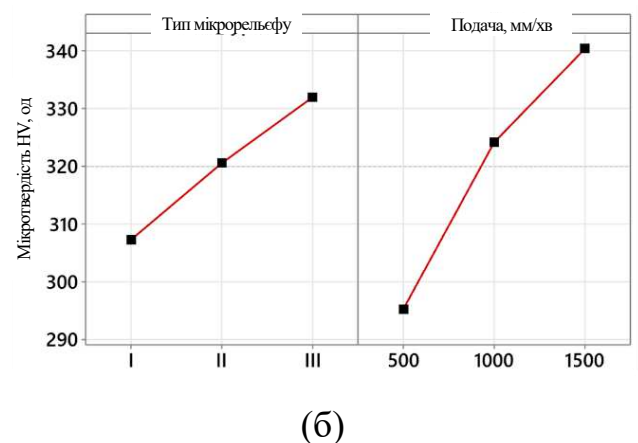
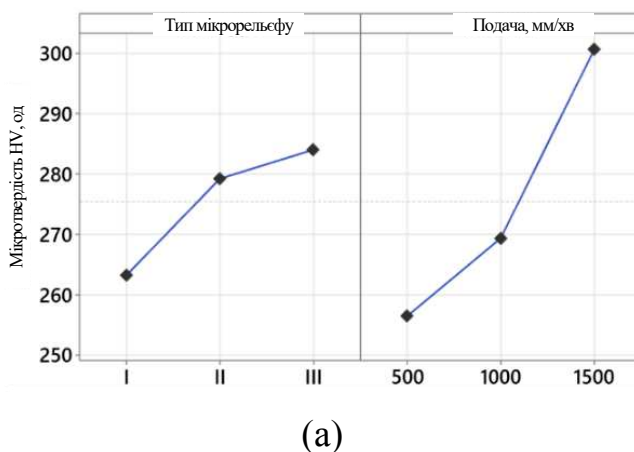
| Джерело | | | Відсоток впливу | | | F-параметр | P-параметр |
|-------------|---|---------|-----------------|---------|---------|------------|------------|
| Модель | 8 | 20527.6 | 97.84% | 20527.6 | 2565.96 | 203.47 | 0.000 |
| Тип ЧРМР | 2 | 4572.0 | 21.79% | 4572.0 | 2286.02 | 181.27 | 0.000 |
| Подача, f | 2 | 15633.6 | 74.51% | 15633.6 | 7816.82 | 619.84 | 0.000 |

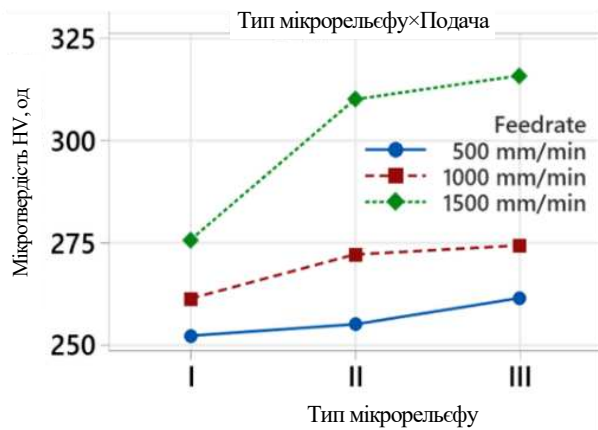
| | | | | | | | |
|------------------------|----|---------|---------|-------|-------|------|-------|
| Тип ЧРМР*подача f | 4 | 322.0 | 1.53% | 322.0 | 80.49 | 6.38 | 0.001 |
| Похибки | 36 | 454.0 | 2.16% | 454.0 | 12.61 | | |
| Всього | 44 | 20981.6 | 100.00% | | | | |

Як видно з Таблиці 4.5, усі предиктори та взаємодія між ними в регресійній моделі (4.2) також є статистично значущими, оскільки розраховані значення Р-значення для них менші за 0.05 (тобто 5%). Це означає, що нульову гіпотезу відхилено для всіх них. Відсотковий внесок у модель (таблицю 4.5) розподіляється таким чином: подача має найбільший вплив (74.51%), за нею слідує тип ЧРМР (21.79%). Взаємодія між ними має лише 1.53% внеску у параметр $HV_{0.01}^B$ у моделі (4.2).

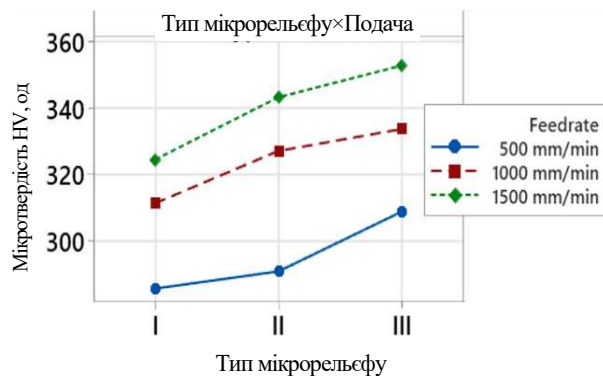
4.6.2. Діаграми основних ефектів та взаємодій

На основі отриманих регресійних моделей (4.1) та (4.2) графічне представлення основних ефектів і взаємодій факторів регресійних моделей наведено на рис. 4.6.





(в)



(г)

Рисунок 4.6. Графіки основних ефектів та графік взаємодій для: (а) та (в) мікротвердості $HV_{0.01}$ на виступах ЧРМР; (б) та (г) мікротвердості $HV_{0.01}$ у впадинах ЧРМР.

Діаграми основних ефектів (рис. 4.6, а та б) показують, що значення мікротвердості $HV_{0.01}$ зростає як у зоні під гребенями, так і в зоні під дном слідів ЧРМР зі збільшенням подачі під час операції формування мікрорельєфу. Подібна тенденція спостерігається і для різних типів ЧРМР – від типу I, де канавки не перетинаються, до типу III, де вони перехрещуються. Як видно з діаграм взаємодії на (рис. 4.6 в та г, тенденції впливу дуже близькі до тих, що спостерігаються для основних ефектів, як для мікротвердості $HV_{0.01}$ на дні канавок, так і в зоні виступів.

4.7 Спосіб формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обкочуванням

В сучасному машинобудуванні триває пошук більш прогресивних методів формування регулярних мікрорельєфів, зокрема тих, що забезпечували б стабільність геометричних параметрів, покращені фізико-механічні і відповідно, експлуатаційні властивості поверхні.

Недоліком існуючих технічних рішень є те, що не обґрунтовані зусилля вібраційного обкочування, які діють з сторони кульки на оброблювану

поверхню, не забезпечена постійність обертання кульки внаслідок осциляційного її руху, що може призвести до її проковзування по оброблюваній поверхні, не враховані вихідні параметри шорсткості поверхні, яка підлягає вібраційному обробленню.

Запропонований спосіб формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обкочуванням реалізується наступним чином. Деформувальним елементам – кулькам 1 надають основний поступальний рух подачі і додатково цим деформувальним елементам 1 надають зворотно-поступальний осциляційний рух з амплітудою 2-4 мм і частотою близько 1000 подвійних ходів на хвилину. Напрямок зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярний напрямку руху подачі.

Перед цим досліджують шорсткість оброблюваної поверхні заготовки 2. З оброблюваної поверхні 3 на базовій довжині l , перпендикулярно до слідів оброблення на попередньому переході (рис. 5.1) знімають не менше 10 профілограм ($i=1,2,3..10$) і на кожній з них визначають параметр шорсткості – максимальне висота профілю $R_{a_{i\max}}$. Приймаємо відповідність розсіювання величин $R_{a_{i\max}}$ нормальному закону розподілу. За методом ітерацій для вибірки обсягом 10 значень $R_{a_{i\max}}$ визначають характеристики розподілу величини $R_{a_{\max}}$, а саме математичне сподівання $M(R_{a_{\max}})$ і дисперсію $D(R_{a_{\max}})$ і визначають максимальне вибіркоче значення $R_{a_{\max}^6} = M(R_{a_{\max}}) + 3\sqrt{D(R_{a_{\max}})}$.

Після цього заготовку 2 з оброблюваною поверхнею 3 встановлюють і закріплюють на столі 4 верстату (на фіг. не показано). Стіл 4 переміщують вгору, доводять до контакту оброблювану поверхню з деформувальним елементом 1 – кулькою і стискають пружний елемент – пружину стиснення 5, тим самим забезпечуючи необхідне зусилля F вібраційного обкочування. Після цього деформувальному елементу 1 надають високочастотний осциляційний рух D_{i_r} в напрямку перпендикулярному до оброблюваної поверхні 3 з величиною $A_c = (1,5-1,2)R_{a_{\max}^6}$ і частотою S_k . Разом з цим деформуючому елементу 1 надають

горизонтальний зворотно-поступальний осциляційний рух D_{in} і рух повздовжньої подачі $D_{спз}$.

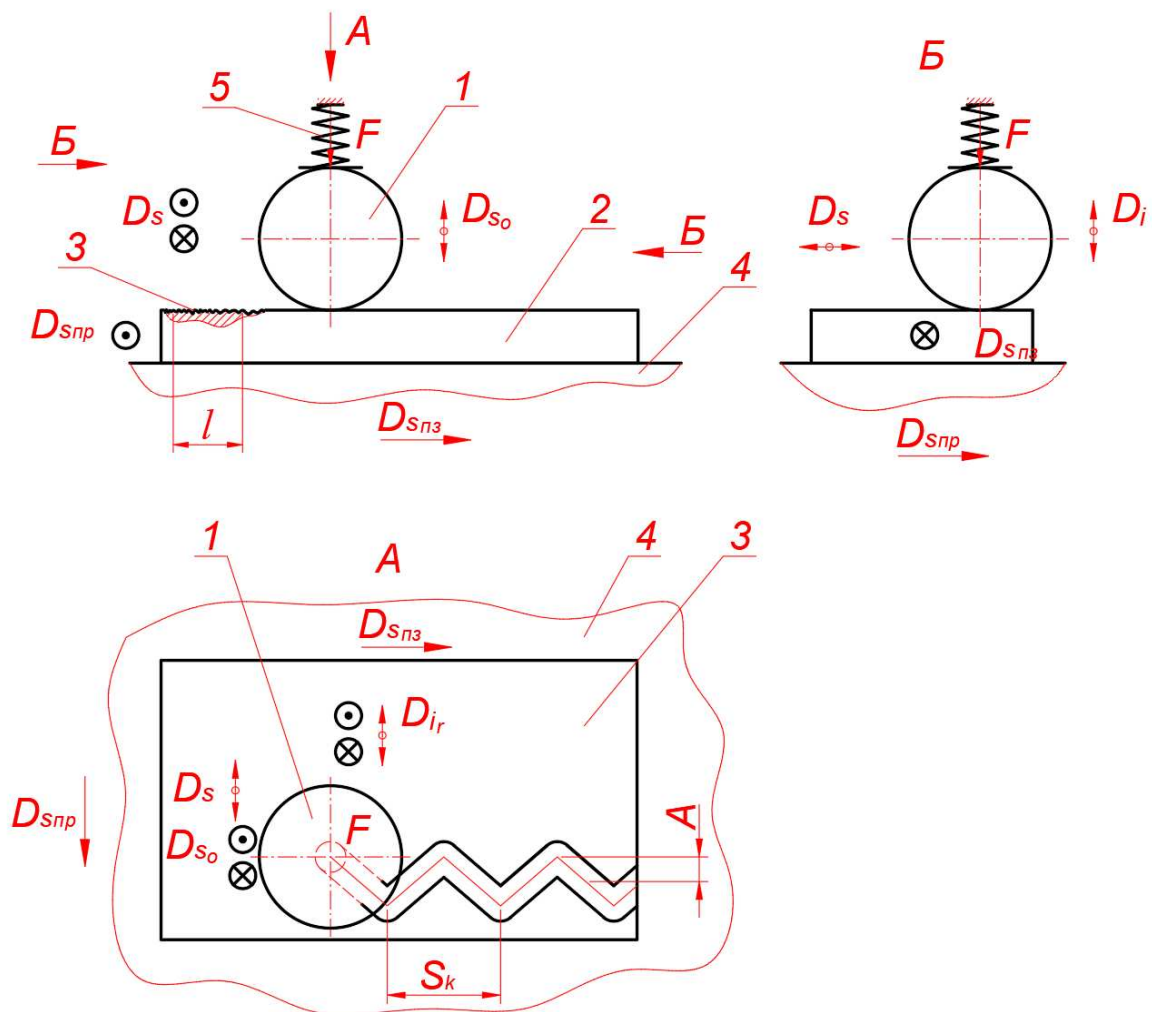


Рисунок 5.1. Принципова схема реалізації технології формування регулярного мікрорельєфу [83]

При досягненні кулькою 1 лівого крайнього положення заготовки і виходу її із контакту з оброблюваною поверхнею 3 заготовки 2 всі механічні рухи відключають, заготовку виставляють по лівому її краю у вихідне положення, вибираючи при цьому зазори і продовжують процес.

Спосіб реалізується, наприклад, на широко універсальному інструментальному фрезерному верстаті моделі 676 у якого повздовжня подача кінематично зв'язана з обертовим рухом шпинделя.

Деформувальним елементам – кулькам 1 з діаметром 3 мм надають основний поступальний рух подачі в межах 0,25-0,5 м/хв і додатково цим деформувальним елементам надають зворотно-поступальний осциляційний рух з амплітудою 2-4 мм і частотою близько 1000 подвійних ходів на хвилину. Напрямок зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярний напрямку руху подачі.

Спочатку досліджують шорсткість оброблюваної поверхні заготовки 2. З оброблюваної поверхні 2 на базовій довжині l , перпендикулярно до слідів оброблення на попередньому переході знімають не менше 10 профілограм ($i=1,2,3..10$) і на кожній з них визначають параметр шорсткості – максимальне висота профілю $R_{a_{i\max}}$ (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Значення параметра шорсткості – максимальної висоти профілю

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $R_{a_{i\max}}$ | 0,25 | 0,27 | 0,23 | 0,25 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,25 | 0,26 | 0,23 |

Приймаємо відповідність розсіювання величин $R_{a_{i\max}}$ нормальному закону розподілу. За методом ітерацій для вибірки обсягом 10 значень $R_{a_{i\max}}$ визначають характеристики розподілу величини $R_{a_{\max}}$, а саме математичне сподівання $M(R_{a_{\max}}) = 0,25$ і дисперсію $D(R_{a_{\max}}) = 0,0125$ і визначають максимальне вибіркоче значення $R_{a_{\max}^6} = M(R_{a_{\max}}) + 3\sqrt{D(R_{a_{\max}})} = 0,58$.

Після цього заготовку 2 з оброблюваною поверхнею 3 встановлюють і закріплюють на столі 4 верстату (на фіг. не показано). Стіл 4 переміщують вгору, доводять до контакту оброблювану поверхню з деформуючим елементом – кулькою 1 і стискають пружний елемент – пружину стиснення 5, тим самим забезпечуючи необхідне зусилля F вібраційного обкочування. Після цього

деформуючому елементу 1 надають високочастотний осциляційний рух D_{ir} в напрямку перпендикулярному до оброблюваної поверхні 3 з величиною $A_e = (1,5-1,2)R_{a_{max}} = 0,87\text{мм}$ і частотою $S_k = 4\text{мм}$ Разом з цим деформуючому елементу 6 надають горизонтальний зворотно-поступальний осциляційний рух D_{in} і рух повздовжньої подачі $D_{s_{пз}}$. При досягненні кулькою 6 лівого крайнього положення заготовки і виходу її із контакту з оброблюваною поверхнею 3 заготовки 2 всі механічні рухи відключають, заготовку виставляють по лівому її краю у вихідне положення, вибираючи при цьому зазори і продовжують процес.

Таким чином запропонована корисна модель забезпечує обґрунтовані зусилля вібраційного обкочування, які діють з сторони кульки на оброблювану поверхню, постійність обертання кульки внаслідок осциляційного її руху.

4.8 Характеристики відносної площі деяких квазірегулярних мікрорельєфів сформованих вібраційним обкочуванням

Відносна площа, яку займає регулярний мікрорельєф (РМР) F_k – виражене в процентах відношення площі, що займає РМР до площі оброблюваної поверхні деталі з РМР [61].

Площа віброобкатаної поверхні є важливою характеристикою регулярного мікрорельєфу, яка суттєво впливає на експлуатаційні показники віброобкатаних поверхонь [21]. Для формування РМР на циліндричних поверхнях потрібно три рухи: обертовий рух заготовки, осциляційний рух віброобкатника та рух його подачі. Однак для формування РМР на плоских поверхнях потрібно лише рух подачі та осциляційний рух віброобкатника. Часто для формування РМР використовують свердлильні і токарні верстати з механічною коробкою подач. Враховуючи те, що на таких верстатах подача носить стохастичний характер [14] то і площа канавок сформована на таких верстатах також носить стохастичний характер.

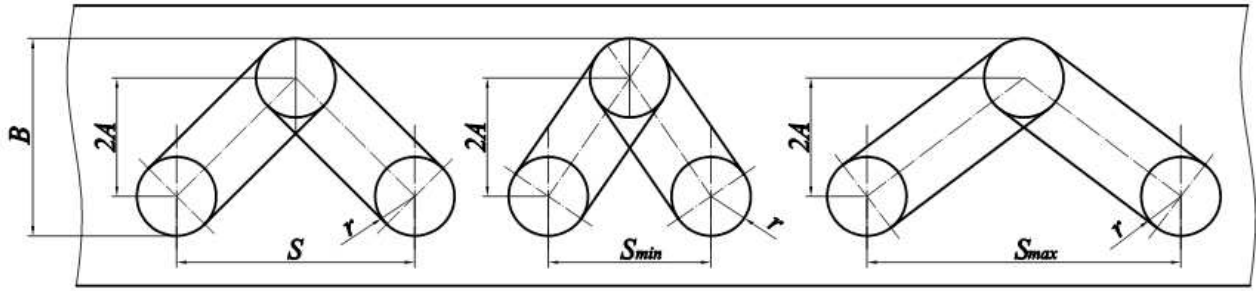


Рисунок 5.2. Схема для визначення площ віброобкатаних поверхонь

Формулу для визначення площі віброобкатаної канавки записано у вигляді:

$$F = 4r \sqrt{\frac{S_{\text{под}}^2 + 16A^2}{4}} - r^2 \cdot \text{tg arctg} \left(\frac{S}{4A} \right) + 2\pi r^2 \cdot \frac{\text{arctg} (S_{\text{под}}/4A)}{360}. \quad (5.1)$$

Для наглядного порівняння відносних площ віброобкатаних поверхонь задамося вихідними даними:

r – діаметр кульки, яка утворює канавку, $r=0,2$ мм.;

$\bar{S}_{\text{под}}$ – середнє значення подачі, $\bar{S}_{\text{под}}=0,6$ мм.;

σ – середньоквадратичне відхилення, $\sigma=0,02$.

A – значення амплітуди коливань, $A=1$ мм.

2. Знаходимо граничні значення подач $S_{\text{под.max}}$ і $S_{\text{под.min}}$ при $\sigma=0,02$

$$S_{\text{под max}} = \bar{S} + 3 \cdot \sigma = 0,6 + 3 \cdot 0,02 = 0,72 \text{ мм.}$$

$$S_{\text{под min}} = \bar{S} - 3 \cdot \sigma = 0,6 - 3 \cdot 0,02 = 0,48 \text{ мм.}$$

3. Знаходимо площу канавок $F_{\text{кан}}$ для різних значень $S_{\text{под}}$ за формулою (5.1)

$$F_{cep} = 4 \cdot 0,2 \sqrt{\frac{0,6^2 + 16 \cdot 1^2}{4}} - 0,2^2 \cdot tg \arctg\left(\frac{0,6}{4 \cdot 1}\right) + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot \frac{\arctg(0,6/4 \cdot 1)}{360} = 1,618$$

мм²;

$$F_{max} = 4 \cdot 0,2 \sqrt{\frac{0,72^2 + 16 \cdot 1^2}{4}} - 0,2^2 \cdot tg \arctg\left(\frac{0,72}{4 \cdot 1}\right) + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot \frac{\arctg(0,72/4 \cdot 1)}{360} = 1,626$$

мм²;

$$F_{min} = 4 \cdot 0,2 \sqrt{\frac{0,48^2 + 16 \cdot 1^2}{4}} - 0,2^2 \cdot tg \arctg\left(\frac{0,48}{4 \cdot 1}\right) + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot \frac{\arctg(0,48/4 \cdot 1)}{360} = 1,611$$

мм²;

4. Знаходимо площу стрічки $S_{cmp.}$, на якій розміщена канавка

В загальному випадку площі стрічки буде визначатись із залежності

$$S_{cmp} = (2A + \rho) \cdot (S_{nod} + \rho). \quad (5.2)$$

Оскільки $S_{nod} / 2 = 2A$, то $A = S_{nod} / 4$, відповідно

$$S_{cmp} = (S_{nod} / 2 + \rho) \cdot (S_{nod} + \rho) \quad (5.3)$$

$$S_{cmp.cep} = (S_{nod.cep} / 2 + \rho) \cdot (S_{nod.cep} + \rho) = (0,6 / 2 + 0,2) \cdot (0,6 + 0,2) = 0,4 \text{ мм}^2.$$

$$S_{cmp.max} = (S_{nod.max} / 2 + \rho) \cdot (S_{nod.max} + \rho) = (0,72 / 2 + 0,2) \cdot (0,72 + 0,2) = 0,5152 \text{ мм}^2.$$

$$S_{cmp.min} = (S_{nod.min} / 2 + \rho) \cdot (S_{nod.min} + \rho) = (0,48 / 2 + 0,2) \cdot (0,48 + 0,2) = 0,2992 \text{ мм}^2.$$

5. Знаходимо відносну площу віброобкатаних поверхонь.

Відносну площу знаходимо по відношенню до максимального значення площі стрічки $S_{cmp.max}$

$$F_{\kappa} = \frac{F_{кан}}{S_{cmp.max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot S_{nod} + \frac{\pi \cdot \rho^2}{8} - \frac{\rho^2}{2}}{(S_{nod.} / 2 + \rho) \cdot (S_{nod.} + \rho)} \quad (5.4)$$

$$F_{к. \min} = \frac{F_{кан. \min}}{S_{стр. \max}} = \frac{0,1314}{0,5152} = 0,255;$$

$$F_{к. \min} = \frac{F_{кан. \min}}{S_{стр. \max}} = \frac{0,1654}{0,5152} = 0,321;$$

$$F_{к. \max} = \frac{F_{кан. \max}}{S_{стр. \max}} = \frac{0,1993}{0,5152} = 0,386.$$

4.9. Висновки до розділу 4

1. Підсумовуючи проведені дослідження впливу типу мікрорельєфу та величини подачі на мікротвердість, можна стверджувати, що тип ЧРМР та швидкість деформації (подачі) суттєво впливають на зміну мікротвердості в підповерхневих шарах канавок ЧРМР. Як видно з мінімальних та максимальних середніх значень на діаграмах розсіювання (див. рис. 4.4), це збільшення становить від 23,1% до 54,1% в області напливів та від 39,4% до 72,2% під поверхнею дна канавки. Це залежить як від параметра режиму обкатки кулькою – подачі, так і від типу ЧРМР, сформованого на поверхні. Насправді тип ЧРМР суттєво характеризує густоту канавок на поверхні й, відповідно, визначає їхній взаємний вплив на мікротвердість під час формування. Найвища мікротвердість (як біля напливів, так і на дні канавок) спостерігалась для ПРР типу III, де густота канавок була найбільшою, тоді як найнижчу мікротвердість зафіксовано для канавок типу I, де густота була найменшою. Таким чином можна стверджувати про взаємний вплив канавок на загальну мікротвердість поверхні з ЧРМР.

2. Таким чином, розуміння впливу типу ЧРМР та швидкості деформування (подачі) на мікротвердість поверхні дає змогу керовано змінювати цей параметр у межах від 23,1 до 72,2% залежно від обраного типу ЧРМР та швидкості його формування (тобто подачі при обкатці кулькою). Отримані результати свідчать про можливість регулювання мікроструктурного стану дна та країв канавок

ЧРМР шляхом налаштування інтенсивності деформації в зоні обробки. Основним впливовим параметром є подача, яка визначає швидкість деформації та формує структурно-фазовий стан і мікротвердість поверхневого та приповерхневого шарів нержавної сталі AISI 304.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто технологічні особливості формування регулярного мікрорельєфу I виду на плоских поверхнях методом вібраційного обкочування вібраційною головкою із кульковими обкатниками. Отримано аналітичні залежності для визначення шляху, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при заданих режимах формування мікрорельєфу. Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі поверхні з регулярним мікрорельєфом для рельєфу з паралельними канавками, сформованого на плоских поверхнях. Встановлено умови формування мікрорельєфу в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу та технологічних режимів його формування. Побудовано графіки залежності відносної площі віброобкочування F_v від повздовжньої подачі інструменту, S_{nz} та від частоти пдв.х. осциляцій обкатників, а також графіки відносної площі віброобкочування F_v від кроку канавки t_k .

2. Розглянуто схеми формування частково регулярних мікрорельєфів з канавками, що не перетинаються (I вид), перетинаються (III вид) та повністю регулярного мікрорельєфу (IV вид). Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі регулярних та частково регулярних мікрорельєфів із різною міжосьовою відстанню канавок та врахуванням площі їх перекриття. Побудовані графічні залежності для визначення відносної площі регулярних мікрорельєфів в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу, швидкості подачі інструменту та кількості подвійних ходів, як найбільш впливових параметрів на відносну площу мікрорельєфу. Встановлено, що на зміну відносної площі мікрорельєфу в більшій мірі впливає зміна технологічних режимів формування мікрорельєфу – швидкості подачі та кількості подвійних ходів і в меншій мірі геометричні параметри мікрорельєфу – амплітуда та крок.

3. Встановлено, що частково регулярні мікрорельєфи (ЧРМР), незалежно від їх типу, демонструють приблизно у 10 разів вищу здатність утримувати мастило (маслоємність) порівняно з поверхнями, які не мають сформованого

мікрорельєфу із пластично деформованими канавками. Водночас ця особливість знижує їх несучу здатність. Проведено дослідження впливу типу мікрорельєфу та режимів його формування на здатність поверхонь утримувати мастило. Встановлено, що тип мікрорельєфу практично не чинить суттєвого впливу на обсяг утримуваного мастила, окрім значень отриманих при подачі 1500 ммхв, де це значення становить $V_o = 0.0013 \text{ мм}^3/\text{см}^2$. Для інших типів мікрорельєфів значення обсягу мастила коливається в межах $V_o = 0.0105 - 0.0168 \text{ мм}^3/\text{см}^2$. Серед різних типів досліджених ЧРМР I та III типи демонструють кращу комбінацію функціональних властивостей, ніж II тип ЧРМР, який показав найнижчі результати за параметрами шорсткості поверхні та малоємністю поверхні.

4. Встановлено, що швидкість подачі має суттєвий вплив лише на висоту нерівностей профілю поверхні. Разом з цим вона істотно не впливає на здатність поверхні утримувати мастило та на відносну опорну довжину профілю поверхні. Це дозволяє стверджувати, що швидкість подачі можна встановлювати на максимально можливому рівні з метою забезпечення найвищої продуктивності процесу формування ЧРМР деформувальним елементом у вигляді кульки, якщо шорсткість поверхні не є визначальним фактором при обробленні поверхні.

5. Тип ЧРМР та швидкість деформації (подачі) суттєво впливають на зміну мікротвердості в підповерхневих шарах канавок ЧРМР. Ця зміна становить від 23,1% до 54,1% в області напливів та від 39,4% до 72,2% під поверхнею дна канавки. Це залежить як від параметра режиму обкатки кулькою – подачі, так і від типу ЧРМР, сформованого на поверхні. Насправді тип ЧРМР суттєво характеризує густоту канавок на поверхні й, відповідно, визначає їхній взаємний вплив на мікротвердість під час формування. Найвища мікротвердість спостерігалась для ПРР типу III, де густота канавок була найбільшою, тоді як найнижчу мікротвердість зафіксовано для канавок типу I, де густота була найменшою. Таким чином можна стверджувати про взаємний вплив розміщення канавок на загальну мікротвердість поверхні з ЧРМР.

6. Таким чином, розуміння впливу типу ЧРМР та швидкості деформування (подачі) на мікротвердість поверхні дає змогу керовано змінювати цей параметр

у межах від 23,1 до 72,2% залежно від обраного типу ЧРМР та швидкості його формування (тобто подачі при обкатці кулькою). Отримані результати свідчать про можливість регулювання мікроструктурного стану дна та країв канавок ЧРМР шляхом налаштування інтенсивності деформації в зоні обробки. Основним впливовим параметром є подача, яка визначає швидкість деформації та формує структурно-фазовий стан і мікротвердість поверхневого та приповерхневого шарів нержавної сталі AISI 304.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Aftanaziv I. S., Kyrychok P. O., Melnychuk P. P. Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation. Zhytomyr: ZhTI Publishing, 2001. 516 p.
2. Malshe A. P., Bapat S., Rajurkar K. P., Haitjema H. Bio-inspired textures for functional applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 67, Issue 2. P. 627–650. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.05.001.
3. Bonsen B., Klaassen T. W. G. L., Pulles R. J., Simons S. W. H., Steinbuch M., Veenhuizen P. A. Performance optimisation of the push-belt CVT by variator slip control. *International Journal of Vehicle Design*. 2005. Vol. 39, No. 3. P. 232–256.
4. Bakhtizin R. N., Urazakov K. R., Latypov B. M., Ishmukhametov B. H., Narbutovskikh A. Y. The influence of regular microrelief forms on fluid leakage through plunger pair of sucker rod pump. *Oil Industry Journal*. 2017. Issue 4. P. 113–116.
5. Bonsen B., Metsenaere C., Klaassen T. W. G. L., Meerakker K. G. O., Steinbuch M., Veenhuizen P. A. Simulation and control of slip in a continuously variable transmission. *Information and Computation/Information and Control – IANDC*. 2004.
6. Byun J. W., Shin H. S., Kwon M. H., Kim B. H., Chu C. N. Surface texturing by micro ECM for friction reduction. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2010. Vol. 11. P. 747–753. DOI: 10.1007/s12541-010-0088-y.
7. Cao C., Zhu J., Tanaka T. Influence of burnishing process on microstructure and corrosion properties of Mg alloy AZ31. *Advanced Surface Enhancement*. Singapore: Springer, 2020. P. 153–165. DOI: 10.1007/978-981-15-0054-1_11.
8. Grădinaru C.-G., Nagîț G. Study on the application limitations of a cold rolling device for internal cylindrical surfaces. *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*. 2025. Vol. 71 (75), No. 1. DOI: 10.2478/bipcm-2025-0004.

9. Dimitrov D. M., Slavov S. D., Mincheva D. Y., Cavadas A. M. S. Ultrasonic resonance fatigue testing of 6082 aluminum alloy. *Metals*. 2025. Vol. 15. Art. 127. DOI: 10.3390/met15020127.
10. DSTU ISO 4287:2012. Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Terminy, vyznachennia poniat i parametry struktury (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT).
11. DSTU ISO 4288:2001. Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Pravyla i protsedury otsinennia struktury (ISO 4288:1996, IDT).
12. Dzyura V. Dynamics of regular microrelief formation on internal cylindrical surfaces. *Scientific Journal of the TNTU*. 2021. No. 1 (101). P. 115–128.
13. Dzyura V. Modeling of partially regular microreliefs formed on the end faces of rotation bodies by a vibration method. *UJMEMS*. 2020. Vol. 6, No. 1. P. 30–38.
14. 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. Vol. 8. Art. 965. DOI: 10.3390/met8110965.
15. Dzyura V., Maruschak P. Optimizing the formation of hydraulic cylinder surfaces, taking into account their microrelief topography analyzed during different operations. *Machines*. 2021. Vol. 9. Art. 116. DOI: 10.3390/machines9060116.
16. Dzyura V., Maruschak P., Kozbur H., Kryvyi P., Prentkovskis O. Determining optimal parameters of grooves of partially regular microrelief formed on end faces of rotary bodies. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 5, No. 1. P. 18–29. DOI: 10.1520/SSMS20200057.
17. Dzyura V., Bytsa R. Analysis of the directions of improving regular microreliefs. *Problems of Tribology*. 2024. Vol. 29, No. 3 (113). P. 6–14. DOI: 10.31891/2079-1372-2024-113-3-6-14.

18. Dzyura V., Maruschak P., Kuchvara I., Tkachenko I. Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 71, No. 1. P. 41–50.

19. Dzyura V., Maruschak P., Semehen V. et al. Analysis of causes that lead to failure of conical discs of variable automatic transmissions. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2024. Vol. 24. P. 1077–1082. DOI: 10.1007/s11668-024-01912-y.

20. Dzyura V., Maruschak P., Slavov S., Dimitrov D. Applying regular relief onto conical surfaces of continuously variable transmission to enhance its wear resistance. *Transport*. 2023. Vol. 38, No. 3. P. 178–189. DOI: 10.3846/transport.2023.20628.

21. Dzyura V., Maruschak P., Slavov S., Dimitrov D., Vasileva D. Experimental research of partial regular microreliefs formed on rotary body face surfaces. *Aviation*. 2021. Vol. 25, No. 4. P. 268–277. DOI: 10.3846/aviation.2021.15889.

22. Dzyura V., Maruschak P., Bytsa R., Zinchenko I. Partially regular microreliefs formed by rotation. *Construction Materials*. 2025. Vol. 5. Art. 2. DOI: 10.3390/constrmater5010002.

23. Dzyura V., Maruschak P., Slavov S., Dimitrov D., Semehen V., Markov O. Evaluating some functional properties of surfaces with partially regular microreliefs formed by ball-burnishing. *Machines*. 2023. Vol. 11. Art. 633. DOI: 10.3390/machines11060633.

24. Dzyura V., Maruschak P., Bytsa R., Komar R., Teslia V., Menou A. Failure analysis of ICE cylinder units and technology for their elimination. *Eng*. 2025. Vol. 6. Art. 152. DOI: 10.3390/eng6070152.

25. Yagyaev E., Shron L., Meniuk D. Increasing the operational reliability of car variators due to creating regular surface microrelief by laser ablation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 889. Art. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/889/1/012007.

26. Evans C. J., Bryan J. B. Structured, textured or engineered surfaces. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1999. Vol. 48, No. 2. P. 541–556.

27. Schneider G. Service properties of parts with regular microrelief. 2nd ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1982. 253 p.
28. Grützmacher P. G., Profito F. J., Rosenkranz A. Multi-scale surface texturing in tribology—current knowledge and future perspectives. *Lubricants*. 2019. Vol. 7, No. 11. Art. 95. DOI: 10.3390/lubricants7110095.
29. Gurey V., Hurey I. Influence of surface hardened nanocrystalline layers on the resistance of contact fatigue destruction. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 483–491. DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_47.
30. Gurey V., Shynkarenko H., Kuzio I. Mathematical model of the thermoelasticity of the surface layer of parts during discontinuous friction treatment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 12–22. DOI: 10.1007/978-3-030-77823-1_2.
31. Gurey V., Hurey I. The effect of the hardened nanocrystalline surface layer on durability of guideways. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. P. 63–72. DOI: 10.1007/978-3-030-40724-7_7.
32. Hamdi A. Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. *Archive of Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 67. P. 73–95. DOI: 10.24425/ame.2020.131684.
33. Van der Meulen S. High-performance control of continuously variable transmissions: proefschrift. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010. ISBN 978-90-386-2389-4.
34. Hurey I., Hurey T., Gurey V. Wear resistance of hardened nanocrystalline structures in the course of friction of steel-grey cast iron pair in oil-abrasive medium. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. P. 572–580. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_57.
35. Hurey I., Augousti A., Maruschak P., Flowers A., Gurey V., Dzyura V., Prentkovskis O. Influence of process liquids on the formation of strengthened nanocrystalline structures in surface layers of steel parts during thermo-deformation treatment. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Art. 8053. DOI: 10.3390/app14178053.

36. Hurey I., Maruschak P., Augousti A., Flowers A., Gurey V., Dzyura V., Prentkovskis O. Resistance to wear during friction without lubrication of steel-cast iron pairing with nanocrystalline structure-reinforced surface layers. *Lubricants*. 2023. Vol. 11. Art. 418. DOI: 10.3390/lubricants11100418.
37. ISO 1302:2002. Geometrical product specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation.
38. 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.
39. ISO 8785:1998. Surface imperfections – Terms, definitions and parameters. Geneva: International Organization for Standardization, 1998. 20 p.
40. Wang J., Xue W., Gao S., Li S., Duan D. Effect of groove surface texture on the fretting wear of Ti–6Al–4V alloy. *Wear*. 2021. Vol. 486–487. Art. 204079. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204079.
41. Kubatova D., Melichar M. Roughness evaluation using Abbott-Firestone curve parameters. *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*. Vienna, 2019. P. 467–475. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063.
42. Hiremath S. S. A state-of-the-art review on micro electro-discharge machining. *Procedia Technology*. 2016. Vol. 25. P. 1281–1288. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.222.
43. Van der Meulen S. H. High-performance control of continuously variable transmissions. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010. DOI: 10.6100/IR692236.
44. Mezghani S., Demirci I., Zahouani H., El Mansori M. The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction. *Precision Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 210–217.
45. Minitab 21 Support – Minitab. URL: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/> (accessed: 07.01.2025).

46. Montgomery D. C. Design and analysis of experiments. 8th ed. 2013. URL: <http://faculty.business.utsa.edu/manderso/STA4723/readings/Douglas-C.-Montgomery-Design-and-Analysis-of-Experiments-Wiley-2012.pdf> (accessed: 24.04.2023).
47. Kindrachuk M., Radionenko O., Kryzhanovskiy A., Marchuk V. The friction mechanism between surfaces with regular micro grooves under boundary lubrication. *Aviation*. 2014. Vol. 18, No. 2. P. 64–71. DOI: 10.3846/16487788.2014.926642.
48. Nagit G., Slatineanu L., Dodun O., Ripanu M., Mihalache A. Surface layer microhardness and roughness after applying a vibroburnishing process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.07.044.
49. Nagit G., Dodun O., Slatineanu L., Ripanu M., Mihalache A., Hrituc A. Influence of some process input factors on the main dimensions of the grooves generated during the ball vibroburnishing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 968. Art. 012007.
50. Nanbu T., Ren N., Yasuda Y. et al. Micro-textures in concentrated conformal-contact lubrication: effects of texture bottom shape and surface relative motion. *Tribology Letters*. 2008. Vol. 29. P. 241–252. DOI: 10.1007/s11249-008-9302-9.
51. Nix W. D., Gao H. Indentation size effects in crystalline materials: a law for strain gradient plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1998. Vol. 46, No. 3. P. 411–425. DOI: 10.1016/S0022-5096(97)00086-0.
52. Kouediatouka A. N., Ma Q., Liu Q., Mawignon F. J., Rafique F., Dong G. Design methodology and application of surface texture: a review. *Coatings*. 2022. Vol. 12. Art. 1015. DOI: 10.3390/coatings12071015.
53. Pawlus P., Reizer R., Królczyk G. M. et al. A state of the art on surface texture creation modelling methods in machining. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2025. Vol. 32. P. 3141–3167. DOI: 10.1007/s11831-025-10229-4.
54. Pawlus P., Reizer R., Wiczorowski M. Functional importance of surface texture parameters. *Materials*. 2021. Vol. 14. Art. 5326. DOI: 10.3390/ma14185326.

55. 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. Vol. 12, No. 24. Art. 4169. DOI: 10.3390/ma12244169.

56. Pawlus P., Reizer R. Improvement of wear scar volume estimation in reciprocating motion. SSRN. URL: <https://ssrn.com/abstract=4951610> (accessed: 14.04.2026). DOI: 10.2139/ssrn.4951610.

57. Petterson U., Jacobson S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. *Tribology International*. 2003. Vol. 36. P. 857–864. DOI: 10.1016/S0301-679X(03)00104-X.

58. Ranjan P., Hiremath S. S. Role of textured tool in improving machining performance: a review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 43, Part A. P. 47–73. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.011.

59. Radionenko O., Kindrachuk M., Tisov O., Kryzhanovskiy A. Features of transition modes of friction surfaces with partially regular microrelief. *Aviation*. 2018. Vol. 22. P. 86–92.

60. Samanta A., Wang Q., Shaw S., Ding H. Roles of chemistry modification for laser textured metal alloys to achieve extreme surface wetting behaviors. *Materials & Design*. 2020. Vol. 192. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108744.

61. Schneider Y. G. Service properties of parts with regular microrelief. 2nd ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1982. 253 p.

62. Schneider Yu. Formation of surfaces with uniform micropatterns on precision machine and instruments parts. *Precision Engineering*. 1984. Vol. 6, No. 4. P. 219–225. DOI: 10.1016/0141-6359(84)90007-2.

63. Seigars C. M. Modeling of a continuously variable transmission and clutching of a snowmobile. Honors College. 2016. No. 243. URL: <https://digitalcommons.library.umaine.edu/honors/243/>.

64. 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. Vol. 82, No. 3. P. 195–206.

65. 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*. 2016. No. 1 (2).
66. Slavov S., Dimitrov D., Konsulova-Bakalova M. Advances in burnishing technology. *Advanced Machining and Finishing*. Amsterdam: Elsevier, 2021. P. 481–525.
67. Slavov S. D., Dimitrov D. M., Mincheva D. Y., Dzyura V., Maruschak P., Semehen V. Microstructure and microhardness research of steel 304 after forming partially regular reliefs by ball burnishing operation. *Materials*. 2025. Vol. 18. Art. 1565. DOI: 10.3390/ma18071565.
68. Slavov S. D., Valchev G. V. A methodology for acceleration signals segmentation during forming regular reliefs patterns on planar surfaces by ball burnishing operation. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025. Vol. 9. Art. 181. DOI: 10.3390/jmmp9060181.
69. Slavov S. D., Van L. S. B., Vozár M., Gogola P., Dimitrov D. M. Research on AI-driven classification possibilities of ball-burnished regular relief patterns using mixed symmetrical 2D image datasets derived from 3D-scanned topography and photo camera. *Symmetry*. 2025. Vol. 17. Art. 1131. DOI: 10.3390/sym17071131.
70. Slavov S., Dimitrov D. 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*. 2018. Vol. 178. Art. 02005. DOI: 10.1051/matecconf/201817802005.
71. Surfaces with regular microshape. Classification, parameters and characteristics: GOST 24773-81. Moscow: Izdatelstvo Standartov, 1988.
72. Swirad S., Pawlus P. Effect of ball burnishing on fretting at elevated temperatures. *Materials*. 2024. Vol. 17. Art. 5960. DOI: 10.3390/ma17235960.
73. Nanbu T., Ren N., Yasuda Y. et al. Micro-textures in concentrated conformal-contact lubrication: effects of texture bottom shape and surface relative motion. *Tribology Letters*. 2008. Vol. 29. P. 241–252. DOI: 10.1007/s11249-008-9302-9.

74. Tomanik E., El Mansori M., Souza R., Profito F. Effect of waviness and roughness on cylinder liner friction. *Tribology International*. 2018. Vol. 120. P. 547–555.
75. Stadnychenko V., Varvarov V. Results of theoretical and experimental researches of anomalous low friction and wear in tribosystems. *Advances in Materials*. 2019. Vol. 8, No. 4. P. 156–165. DOI: 10.11648/j.am.20190804.14.
76. Wos S., Koszela W., Pawlus P. Comparing tribological effects of various chevron-based surface textures under lubricated unidirectional sliding. *Tribology International*. 2020. Vol. 146. Art. 106205. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106205.
77. Wu W., Chen G., Fan B., Liu J. Effect of groove surface texture on tribological characteristics and energy consumption under high temperature friction. *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11, No. 4. Art. e0152100. DOI: 10.1371/journal.pone.0152100.
78. Xie J., Luo M. J., He J. L., Liu X. R., Tan T. W. Micro-grinding of micro-groove array on tool rake surface for dry cutting of titanium alloy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2012. Vol. 13. P. 1845–1852. DOI: 10.1007/s12541-012-0242-9.
79. Yu H., Wang X., Zhou F. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces. *Tribology Letters*. 2010. Vol. 37. P. 123–130. DOI: 10.1007/s11249-009-9497-4.
80. Zhan X., Yi P., Liu Y., Xiao P., Zhu X., Ma J. Effects of single- and multi-shape laser-textured surfaces on tribological properties under dry friction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. Vol. 234, No. 7. P. 1382–1392. DOI: 10.1177/0954406219892294.
81. Zhang Y., Zeng L., Wu Z., Ding X., Chen K. Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston. *Micro & Nano Letters*. 2019. Vol. 14. P. 424–429. DOI: 10.1049/mnl.2018.5535.
82. Zhao M., Li W., Wu Y., Zhao X., Tan M., Xing J. Performance investigation on different designs of superhydrophobic surface texture for composite insulator. *Materials*. 2019. Vol. 12. Art. 1164. DOI: 10.3390/ma12071164.

83. Дзюра В. О., Марущак П. О., Семеген В. О., Палюх А. Я., Марущак О. В., Ціцюра О. І. Спосіб формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обкочуванням: пат. 153223 Україна. № u202203830; заявл. 13.10.2022; опубл. 08.06.2023, Бюл. № 23/2023.

84. Дзюра В. О., Бица Р. О., Семеген В. О. Аналіз сучасних тенденцій вдосконалення топографії поверхонь деталей машин для забезпечення їх експлуатаційних властивостей. Технічний прогрес в АПВ: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 2024. С. 324–328.

85. Дзюра В. О., Марущак П. О. Особливості формування частково регулярних мікрорельєфів на торцевих поверхнях деталей типу «тіла обертання». Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 162 с. ISBN 978-617-7875-36-8.

86. Дзюра В. О., Марущак П. О. Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. 170 с. ISBN 978-617-7875-23-8.

87. Дзюра В. О., Марущак П. О., Семеген В. О., Головка В. В., Федів В. Я. Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів, сформованих на плоских поверхнях. Центральнорукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8 (39), ч. 1. С. 37–47.

88. Дзюра В. О., Семеген В. О. Аналіз причин утворення дефектів на поверхнях деталей автомобільних варіаторів. Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали доп., 19–20 жовт. 2022 р. Рівне: НУВГП, 2022. С. 241–242. Електронне видання.

89. Дзюра В. О., Семеген В. О. Розрахунок відносної площі регулярних мікрорельєфів. Вісник Хмельницького національного університету. 2024. № 4 (339). С. 222–229. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-339-4-35.

90. Дзюра В. О., Семеген В. О. Сучасні проблеми та напрями покращення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин. Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 90-річчю від дня народження проф. Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю каф. техн. механіки та с.-г. машин, Тернопіль, 29–30 верес. 2022 р. / М-во освіти і науки України, Терн. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 193 с.

91. Дзюра В. О., Семеген В. О., Федів В. Я., Крук О. Ю., Марущак П. О. Аналіз причин утворення поверхневих дефектів на робочих поверхнях конусних дисків варіаторних трансмісій. Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту = Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: матеріали конф., 22–24 листоп. 2023 р. С. 156–157.

92. ДСТУ 2413-94. Вимірювання параметрів шорсткості. Терміни та визначення.

93. Киричок П. О., Несхозієвський А. В. Дослідження впливу параметрів мікрорельєфу на якість обробки деталі та експлуатаційні характеристики поліграфічного обладнання. Технологічні комплекси. 2007. № 3–4. С. 74–80.

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

95. Киричок П. О., Хмілярчук О. І. Програмне забезпечення з розрахунку процесів оздоблювально-зміцнюючої обробки циліндричних поверхонь. Технологія і техніка друкарства. 2007. № 3–4. С. 80–85.

96. Киричок П. О. Технологічне забезпечення працездатності та надійності елементів та вузлів поліграфічних машин. Технологія і техніка друкарства. 2003. № 1. С. 71–79.

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

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

99. Киричок П. О. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей виробів при оздоблювально-зміцнюючій обробці: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. Київ, 1995. 32 с.

100. Киричок Т. Ю., Олійник В. Г. Керування технологічними процесами оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання. Технологія і техніка друкарства. 2007. № 3–4. С. 74–80.

101. Кузьмин Ю. П., Помпеев К. П., Целищев А. А. Использование фрезерного станка с ЧПУ для нанесения регулярного микрорельефа на поверхности заготовки. Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 273–277.

102. Кусий Я. М., Топільницький В. Г., Велика О. Т. Прогнозування технологічних параметрів вібраційно-відцентрованого зміцнення деталей із конструкційних матеріалів. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. 2007. № 583. С. 3–11.

103. Кусий Я. М., Топільницький В. Г., Широков В. В. Стан та перспективи розвитку методів викінчувального оброблення довгомірних циліндричних деталей (огляд). Наукові нотатки. 2007. Вип. 20. С. 249–260.

104. Кусий Я. М., Топільницький В. Г., Василів Х. Б. Дослідження микрорельєфу віброзміцнених втулок бурових pomp. 2011.

105. 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.

106. Кусий Я. М., Баранецька О. Р. Аналіз впливу технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювального оброблення на фізичні параметри якості довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2002. № 442. С. 43–52.

107. Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Дослідження впливу режимів вібраційно-відцентрового зміцнення на геометричні параметри якості поверхні довгомірних циліндричних деталей. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2009. Вип. 43. С. 44–51.

108. Лотоцька О. І. Комплексна технологія формування мікрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.01. Київ, 2012. 179 с.

109. Лотоцька О. І. Теоретичні розрахунки опорної площі на циліндричних поверхнях деталей поліграфічного обладнання. Технологія і техніка друкарства. 2011. № 2. С. 66–72.

110. Лотоцька О. І. Узагальнена класифікація пристроїв та інструменту для виконання вібраційного обкатування на деталях поліграфічного обладнання. Технологія і техніка друкарства. 2014. № 2. С. 112–123.

111. Маркович Б. М. Рівняння математичної фізики: навч. посіб. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2010. 384 с.

112. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. Донецк: ДонНТУ, 2009. 346 с.

113. Ступницький В. В. Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. Львів, 2015. 36 с.

114. Павловський М. А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002. 512 с.

115. Бица Р., Семенген В., Крук О. Властивості регулярних мікрорельєфів як засобу забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин. Прикладна механіка: матеріали I Міжнар. наук.-техн. конф., присвяч. 80-річчю з дня народження проф. Чеслава Вікторовича Пульки, 6–7 черв. 2024 р. С. 12–14.

116. Ткачук А. А., Заблоцький В. Ю., Дзюра В. О. Підвищення зносостійкості фрикційних поверхонь обертання методами поверхневого пластичного деформування. Перспективні технології та прилади. 2014. № 5 (2). С. 158–163.

117. Хмілярчук О. І. Пристрої та інструмент для виконання віброобробки на деталях поліграфічного обладнання. Технологія і техніка друкарства. 2006. № 1–2 (11–12). С. 133–137.

ДОДАТКИ

Технічна характеристика верстату ТМ-1



Основні технічні характеристики верстату ТМ-1

| ХОДИ | S.A.E | METRIC |
|---|---------|--------|
| Вісь X | 30.0 in | 762 mm |
| Вісь Y | 12.0 in | 305 mm |
| Вісь Z | 16.0 in | 406 mm |
| Відстань від переднього торця шпинделя до стола (~ макс.) | 20.0 in | 508 mm |
| Відстань від переднього торця шпинделя до стола (~ хв.) | 4.0 in | 102 mm |

| SPINDLE | S.A.E | METRIC |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Максимальная потужність | 7.5 hp | 5.6 kW |
| Максимальная швидкість | 4000 rpm | 4000 rpm |
| Максимальный крутящий момент | 33.0 ft-lbf @ 1200 rpm | 45.0 Nm @ 1200 rpm |
| Система привода | Direct Speed, Belt Drive | Direct Speed, Belt Drive |
| Конус | CT or BT 40 | CT or BT 40 |
| Змащування підшипників | Grease Packed | Grease Packed |
| Охолодження | Air Cooled | Air Cooled |

| СТІЛ | S.A.E | METRIC |
|--|----------|---------|
| Довжина | 47.8 in | 1213 mm |
| Ширина | 10.5 in | 267 mm |
| Ширина T-подібних пазів | 0.630 in | 16 mm |
| Відстань по центру T-подібних пазів | 4.00 in | 102 mm |
| Кількість стандартних T- подібних пазів | 3 | 3 |
| Максимальна вага на столі (рівномірно розподілена) | 1000 lb | 454 kg |

Характеристики профілометра Surftest SJ-301 MITUTOYO

| | |
|--------------------------------|--|
| Модель | 178-952-3D |
| Діапазон вимірювання | вісь z: 350 мкм вісь x: 12,5 мм |
| Вимірювальний блок | |
| Швидкість переміщення | вимір.: 0,25 мм/с; 0,5 мм/с повернення: 1 мм/с |
| Кабель живлення | 1 м |
| маса | 190 г. |
| Стандартный зразок (№ 178-395) | |
| метод вимірювання | індукційний |
| Діапазон вимірювання | 350 мкм |
| голка | алмазна |
| Радіус голки | 2 мкм |
| Радіус насадки | 40 мм |
| Вимірювальне зусилля | 0,75 мН |
| маса | 18 г. |
| Основний блок | |
| Профіль | Первинний профіль (P), профіль шорсткості (R), DIN 4776, MOTIF |
| Параметри | Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Rq, Rv, Sm, S, Pc, R3z, mr, Rpk, Rvk, δc, Rk, Mr1, Mr2, Lo, Ppi, R, AR, Rx, A1, A2 |

| | |
|--------------------------------|---|
| Стандарт шорсткості | DIN, ISO, ANSI, JIS |
| Базова довжина вимірювання (L) | 0,08 мм; 0,25 мм; 0,8 мм; 2,5 мм; 8 мм; по вибору оператора |
| Зміна кроку | λ_c : 0,08 мм; 0,25 мм; 0,8 мм; 2,5 мм; 8 мм λ_s : 2,5 мкм; 8 мкм; 25 мкм |
| Число замірів | x1, x3, x5, xL |
| Фільтр | 2RC-75%, 2RC-75% (фазовая корекція), Гаусс-50% |
| Діапазон дисплею | Ra, Rq: 0,01 мкм~100 мкм Ry, Rz, Rt, Rv, R3z, Rk, Rpk, Rvk, R, Rp, Rx, AR, W, Wx, Wte: 0,02 мкм~300 мкм S, Sm: 2 мкм~4000 мкм HSC, Pc: 2,5/cm~5000/cm Ppi: 6,35~12700/inch δ_c -300мкм +300мкм Lo: 0,1 мм~99,999 мм mr, Mr1, Mr2: 0~100% A1, A2: 0~15000 |
| Екран/збільшення | Вертикальне: 10x, 20x, 50x, 100x, 200x, 500x, 1000x, 2000x, 5000x, 10000x, 20000x, 50000x, 100000x, АВТО Горизонтальне: 1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x, 200x, 500x, 1000x, АВТО |
| Принтер | Друк на термочутливій бумазі (ширина 48 мм) |
| Статистика | Max/Min, середня величина, стандартне відхилення, крива розподілку частоти |
| Оцінка допуску | вище/нижче допуску для трьох параметрів |
| Виключення | Автоматичне через 5 хв |
| Калібрування | Автоматичне калібрування по зразку шорсткості |
| Живлення | Вбудовані акумулятори, адаптер (7,5 V 1,5 W) |
| Робота від акумуляторів | 15 годин (600 вимірювань без друку) |

| | |
|-------------|---------------------|
| вивід даних | RS 232 C, DIGIMATIC |
| маса | 1200 гр. |

Програма для визначення координат опорних точок канавок ЧРМР I типу

```

n := 12 numbers of waves in the
m := numbers of waves in the column
H := 30 height
L := 40 total
Sk := 3
So := 2
kpr := Sk * L / 360 koef
      proporc
Delta x := margin
Delta y := 0
A := 1 Amplitude
i := 0..360

```

```

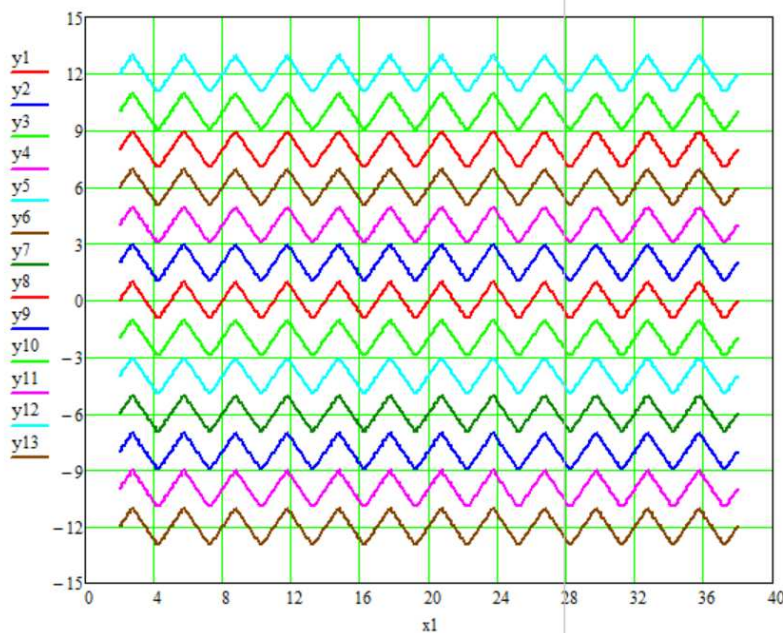
t := sin(90-deg)
j := asin(t)
j = 1.571

phi_i := n * i
x1 := (kpr * phi_i) / L + Delta x

y1 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y
y11(x1) := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y

y2 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y + So
y3 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y - So
y4 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y + 2 * So
y5 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y - 2 * So
y6 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y + 3 * So
y7 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y - 3 * So
y8 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y + 4 * So
y9 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y - 4 * So
y10 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y + 5 * So
y11 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y - 5 * So
y12 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y + 6 * So
y13 := (A / j) * asin[ sin[ ((x1 - Delta x) * L) / kpr - deg ] ] + Delta y - 6 * So

```



Програма для визначення координат опорних точок канавок ЧРМР II типу

$\Delta x := 2$ margin x
 $\Delta y := 0$ margin y
 $A := 1.0$ Amplitude
 $i := 0..360$

$\phi_1 := n \cdot i$

$$x1 := \frac{kpr \cdot \phi}{L} + \Delta x$$

$$y1 := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y$$

$$y2 := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + So$$

$$y3 := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - So$$

$$y4 := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 2 \cdot So$$

$$y5 := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 2 \cdot So$$

$$y6 := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 3 \cdot So$$

$$y7 := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 3 \cdot So$$

$$y8 := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 4 \cdot So$$

$$y9 := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 4 \cdot So$$

$$y10 := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 5 \cdot So$$

$$y11 := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 5 \cdot So$$

$$y12 := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 6 \cdot So$$

$$y13 := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 6 \cdot So$$

$$y11(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y$$

$$y21(x1) := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + So$$

$$y31(x1) := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - So$$

$$y41(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 2 \cdot So$$

$$y51(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 2 \cdot So$$

$$y61(x1) := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 3 \cdot So$$

$$y71(x1) := \frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 3 \cdot So$$

$$y81(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 4 \cdot So$$

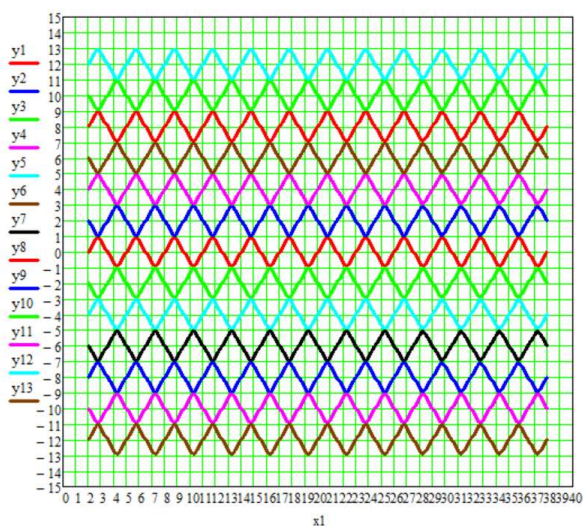
$$y91(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 4 \cdot So$$

$$y101(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 5 \cdot So$$

$$y111(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 5 \cdot So$$

$$y121(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y + 6 \cdot So$$

$$y131(x1) := \frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[\sin \left[\frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \cdot \text{deg} \right] \right] + \Delta y - 6 \cdot So$$

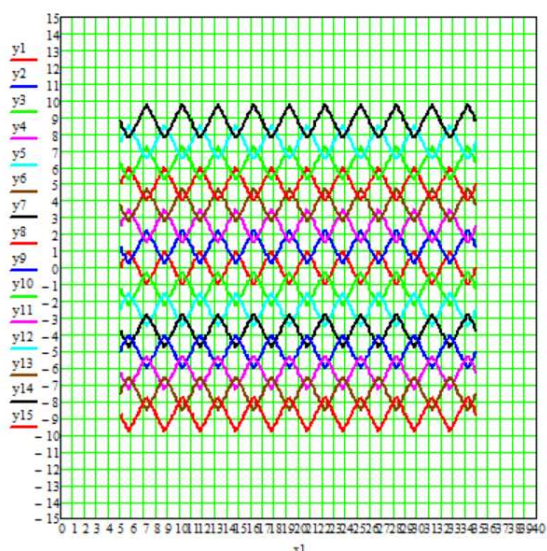


Програма для визначення координат опорних точок канавок ЧРМР III типу

```

n := 10 numbers of vaves in the row      t := sin(90 deg)
m := 4 numbers of vaves in the column   j := asin(t)
total                                     j = 1.571
H := 30 height                           Sk := 3
L := 40 total                             So := 1.25
kpr :=  $\frac{Sk \cdot L \cdot dht}{360}$           koef
                                           proporc
Delta x := 5 margin
Delta y := 0 margin
A := 1.0 Amplitude
i := 0..360
phi := n * i
x1 :=  $\frac{kpr \cdot \phi}{L} + \Delta x$ 
y1 :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y$ 
y2 :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + So$ 
y3 :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - So$ 
y4 :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 2 \cdot So$ 
y5 :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 2 \cdot So$ 
y6 :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 3 \cdot So$ 
y7 :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 3 \cdot So$ 
y8 :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 4 \cdot So$ 
y9 :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 4 \cdot So$ 
y10 :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 5 \cdot So$ 
y11 :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 5 \cdot So$ 
y12 :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 6 \cdot So$ 
y13 :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 6 \cdot So$ 
y14 :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 7 \cdot So$ 
y15 :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 7 \cdot So$ 
y11(x1) :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y$ 
y21(x1) :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + So$ 
y31(x1) :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - So$ 
y41(x1) :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 2 \cdot So$ 
y51(x1) :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 2 \cdot So$ 
y61(x1) :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 3 \cdot So$ 
y71(x1) :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 3 \cdot So$ 
y81(x1) :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 4 \cdot So$ 
y91(x1) :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 4 \cdot So$ 
y101(x1) :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 5 \cdot So$ 
y111(x1) :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 5 \cdot So$ 
y121(x1) :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 6 \cdot So$ 
y131(x1) :=  $\frac{A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 6 \cdot So$ 
y141(x1) :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y + 7 \cdot So$ 
y151(x1) :=  $\frac{-A}{j} \cdot \text{asin} \left[ \sin \left[ \frac{(x1 - \Delta x) \cdot L}{kpr} \right] \cdot \text{deg} \right] + \Delta y - 7 \cdot So$ 

```



Координати для формування мікрорельєфу Туре І на верстаті ТМ-1

| 12 | | 10 | | 8 | | 6 | | 4 | | 2 | | 1 | | 3 | | 5 | | 7 | | 9 | | 11 | | 13 | |
|-------|----|-------|----|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|------|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|-----|-------|-----|
| X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
| 2.00 | 12 | 2.00 | 10 | 2.00 | 8 | 2.00 | 6 | 2.00 | 4 | 2.00 | 2 | 2.00 | 0.00 | 2.00 | -2 | 2.00 | -4 | 2.00 | -6 | 2.00 | -8 | 2.00 | -10 | 2.00 | -12 |
| 2.75 | 13 | 2.75 | 11 | 2.75 | 9 | 2.75 | 7 | 2.75 | 5 | 2.75 | 3 | 2.75 | 1 | 2.75 | -1 | 2.75 | -3 | 2.75 | -5 | 2.75 | -7 | 2.75 | -9 | 2.75 | -11 |
| 4.25 | 11 | 4.25 | 9 | 4.25 | 7 | 4.25 | 5 | 4.25 | 3 | 4.25 | 1 | 4.25 | -1 | 4.25 | -3 | 4.25 | -5 | 4.25 | -7 | 4.25 | -9 | 4.25 | -11 | 4.25 | -13 |
| 5.75 | 13 | 5.75 | 11 | 5.75 | 9 | 5.75 | 7 | 5.75 | 5 | 5.75 | 3 | 5.75 | 1 | 5.75 | -1 | 5.75 | -3 | 5.75 | -5 | 5.75 | -7 | 5.75 | -9 | 5.75 | -11 |
| 7.25 | 11 | 7.25 | 9 | 7.25 | 7 | 7.25 | 5 | 7.25 | 3 | 7.25 | 1 | 7.25 | -1 | 7.25 | -3 | 7.25 | -5 | 7.25 | -7 | 7.25 | -9 | 7.25 | -11 | 7.25 | -13 |
| 8.75 | 13 | 8.75 | 11 | 8.75 | 9 | 8.75 | 7 | 8.75 | 5 | 8.75 | 3 | 8.75 | 1 | 8.75 | -1 | 8.75 | -3 | 8.75 | -5 | 8.75 | -7 | 8.75 | -9 | 8.75 | -11 |
| 10.25 | 11 | 10.25 | 9 | 10.25 | 7 | 10.25 | 5 | 10.25 | 3 | 10.25 | 1 | 10.25 | -1 | 10.25 | -3 | 10.25 | -5 | 10.25 | -7 | 10.25 | -9 | 10.25 | -11 | 10.25 | -13 |
| 11.75 | 13 | 11.75 | 11 | 11.75 | 9 | 11.75 | 7 | 11.75 | 5 | 11.75 | 3 | 11.75 | 1 | 11.75 | -1 | 11.75 | -3 | 11.75 | -5 | 11.75 | -7 | 11.75 | -9 | 11.75 | -11 |
| 13.25 | 11 | 13.25 | 9 | 13.25 | 7 | 13.25 | 5 | 13.25 | 3 | 13.25 | 1 | 13.25 | -1 | 13.25 | -3 | 13.25 | -5 | 13.25 | -7 | 13.25 | -9 | 13.25 | -11 | 13.25 | -13 |
| 14.75 | 13 | 14.75 | 11 | 14.75 | 9 | 14.75 | 7 | 14.75 | 5 | 14.75 | 3 | 14.75 | 1 | 14.75 | -1 | 14.75 | -3 | 14.75 | -5 | 14.75 | -7 | 14.75 | -9 | 14.75 | -11 |
| 16.25 | 11 | 16.25 | 9 | 16.25 | 7 | 16.25 | 5 | 16.25 | 3 | 16.25 | 1 | 16.25 | -1 | 16.25 | -3 | 16.25 | -5 | 16.25 | -7 | 16.25 | -9 | 16.25 | -11 | 16.25 | -13 |
| 17.75 | 13 | 17.75 | 11 | 17.75 | 9 | 17.75 | 7 | 17.75 | 5 | 17.75 | 3 | 17.75 | 1 | 17.75 | -1 | 17.75 | -3 | 17.75 | -5 | 17.75 | -7 | 17.75 | -9 | 17.75 | -11 |
| 19.25 | 11 | 19.25 | 9 | 19.25 | 7 | 19.25 | 5 | 19.25 | 3 | 19.25 | 1 | 19.25 | -1 | 19.25 | -3 | 19.25 | -5 | 19.25 | -7 | 19.25 | -9 | 19.25 | -11 | 19.25 | -13 |
| 20.75 | 13 | 20.75 | 11 | 20.75 | 9 | 20.75 | 7 | 20.75 | 5 | 20.75 | 3 | 20.75 | 1 | 20.75 | -1 | 20.75 | -3 | 20.75 | -5 | 20.75 | -7 | 20.75 | -9 | 20.75 | -11 |
| 22.25 | 11 | 22.25 | 9 | 22.25 | 7 | 22.25 | 5 | 22.25 | 3 | 22.25 | 1 | 22.25 | -1 | 22.25 | -3 | 22.25 | -5 | 22.25 | -7 | 22.25 | -9 | 22.25 | -11 | 22.25 | -13 |
| 23.75 | 13 | 23.75 | 11 | 23.75 | 9 | 23.75 | 7 | 23.75 | 5 | 23.75 | 3 | 23.75 | 1 | 23.75 | -1 | 23.75 | -3 | 23.75 | -5 | 23.75 | -7 | 23.75 | -9 | 23.75 | -11 |
| 25.25 | 11 | 25.25 | 9 | 25.25 | 7 | 25.25 | 5 | 25.25 | 3 | 25.25 | 1 | 25.25 | -1 | 25.25 | -3 | 25.25 | -5 | 25.25 | -7 | 25.25 | -9 | 25.25 | -11 | 25.25 | -13 |
| 26.75 | 13 | 26.75 | 11 | 26.75 | 9 | 26.75 | 7 | 26.75 | 5 | 26.75 | 3 | 26.75 | 1 | 26.75 | -1 | 26.75 | -3 | 26.75 | -5 | 26.75 | -7 | 26.75 | -9 | 26.75 | -11 |
| 28.25 | 11 | 28.25 | 9 | 28.25 | 7 | 28.25 | 5 | 28.25 | 3 | 28.25 | 1 | 28.25 | -1 | 28.25 | -3 | 28.25 | -5 | 28.25 | -7 | 28.25 | -9 | 28.25 | -11 | 28.25 | -13 |
| 29.75 | 13 | 29.75 | 11 | 29.75 | 9 | 29.75 | 7 | 29.75 | 5 | 29.75 | 3 | 29.75 | 1 | 29.75 | -1 | 29.75 | -3 | 29.75 | -5 | 29.75 | -7 | 29.75 | -9 | 29.75 | -11 |
| 31.25 | 11 | 31.25 | 9 | 31.25 | 7 | 31.25 | 5 | 31.25 | 3 | 31.25 | 1 | 31.25 | -1 | 31.25 | -3 | 31.25 | -5 | 31.25 | -7 | 31.25 | -9 | 31.25 | -11 | 31.25 | -13 |
| 32.75 | 13 | 32.75 | 11 | 32.75 | 9 | 32.75 | 7 | 32.75 | 5 | 32.75 | 3 | 32.75 | 1 | 32.75 | -1 | 32.75 | -3 | 32.75 | -5 | 32.75 | -7 | 32.75 | -9 | 32.75 | -11 |
| 34.25 | 11 | 34.25 | 9 | 34.25 | 7 | 34.25 | 5 | 34.25 | 3 | 34.25 | 1 | 34.25 | -1 | 34.25 | -3 | 34.25 | -5 | 34.25 | -7 | 34.25 | -9 | 34.25 | -11 | 34.25 | -13 |
| 35.75 | 13 | 35.75 | 11 | 35.75 | 9 | 35.75 | 7 | 35.75 | 5 | 35.75 | 3 | 35.75 | 1 | 35.75 | -1 | 35.75 | -3 | 35.75 | -5 | 35.75 | -7 | 35.75 | -9 | 35.75 | -11 |
| 37.25 | 11 | 37.25 | 9 | 37.25 | 7 | 37.25 | 5 | 37.25 | 3 | 37.25 | 1 | 37.25 | -1 | 37.25 | -3 | 37.25 | -5 | 37.25 | -7 | 37.25 | -9 | 37.25 | -11 | 37.25 | -13 |
| 38.00 | 12 | 38.00 | 10 | 38.00 | 8 | 38.00 | 6 | 38.00 | 4 | 38.00 | 2 | 38.00 | 0.00 | 38.00 | -2 | 38.00 | -4 | 38.00 | -6 | 38.00 | -8 | 38.00 | -10 | 38.00 | -12 |

Координати для формування мікрорельєфу Type II на верстаті ТМ-1

| 12 | | 10 | | 8 | | 6 | | 4 | | 2 | | 1 | | 3 | | 5 | | 7 | | 9 | | 11 | | 13 | | | |
|-------|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|----|---|----|---|----|----|-----|----|-----|---|---|
| X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
| 2.00 | 12 | | 10 | | 8 | | 6 | | 4 | | 2 | | | | -2 | | -4 | | -6 | | -8 | | -10 | | -12 | | |
| 2.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 4.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 5.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 7.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 8.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 10.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 11.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 13.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 14.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 16.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 17.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 19.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 20.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 22.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 23.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 25.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 26.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 28.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 29.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 31.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 32.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 34.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 35.75 | 13 | | 11 | | 9 | | 5 | | 5 | | 1 | | | | -3 | | -3 | | -7 | | -7 | | -9 | | -11 | | |
| 37.25 | 11 | | 9 | | 7 | | 7 | | 3 | | 3 | | | | -1 | | -5 | | -5 | | -9 | | -11 | | -13 | | |
| 38.00 | 12 | | 10 | | 8 | | 6 | | 4 | | 2 | | | | -2 | | -4 | | -6 | | -8 | | -10 | | -12 | | |

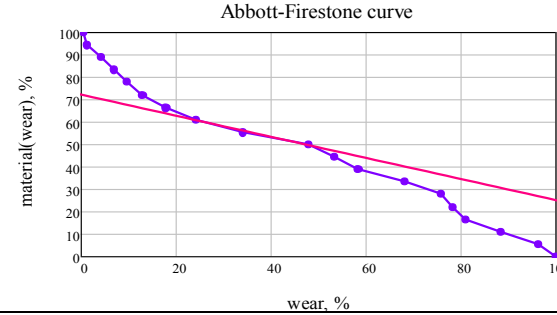
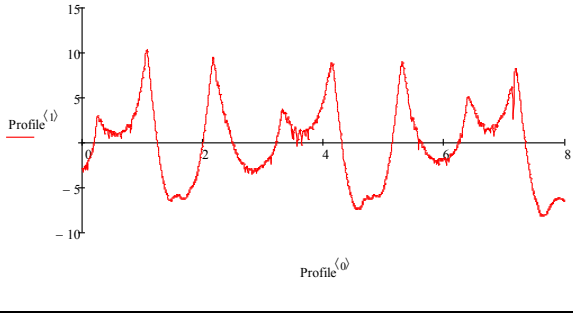
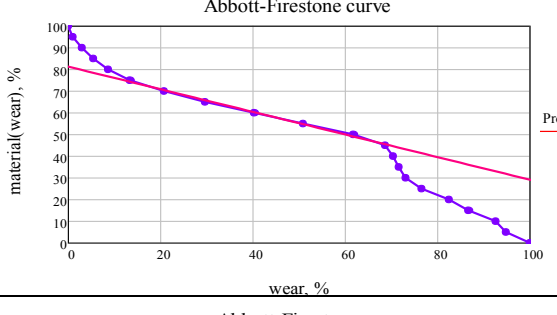
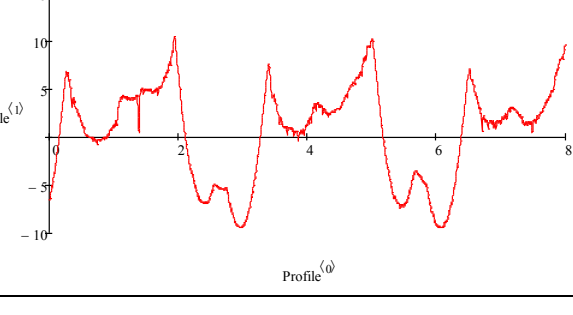
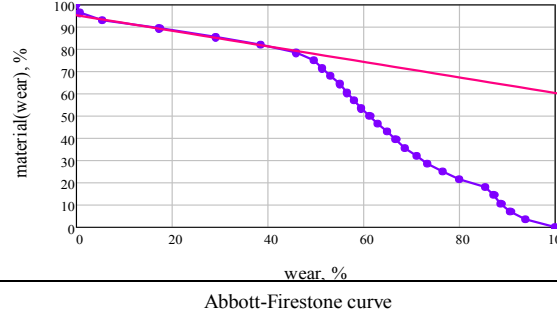
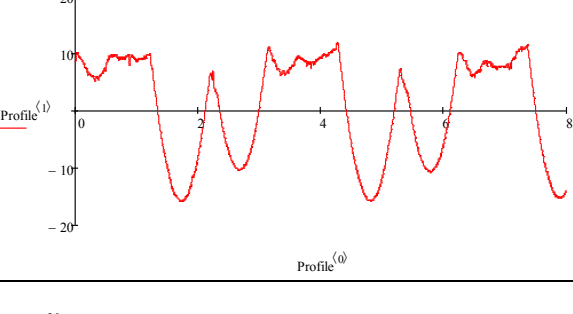
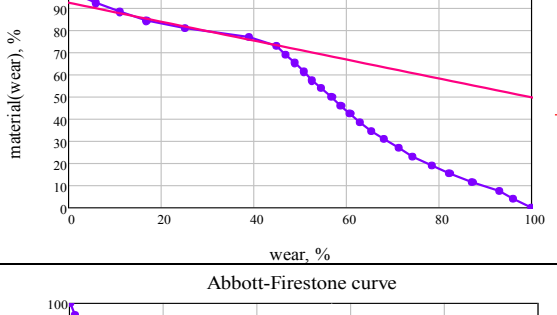
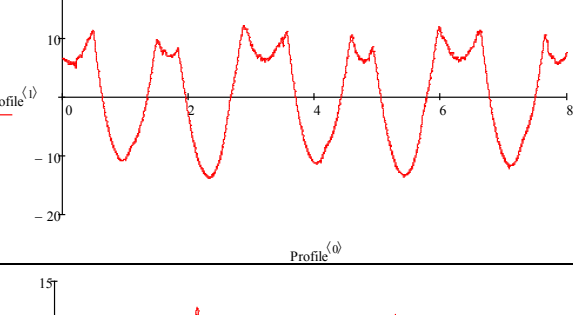
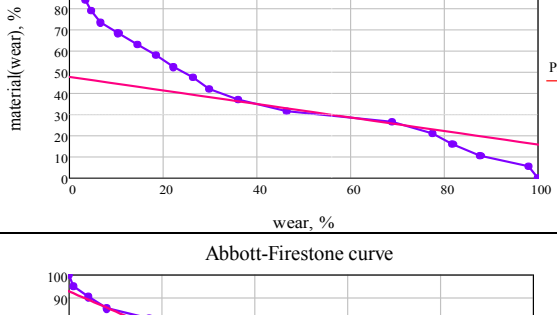
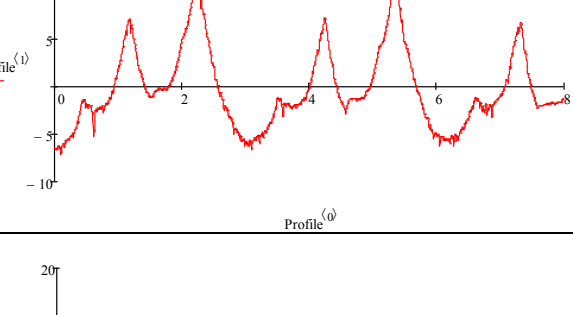
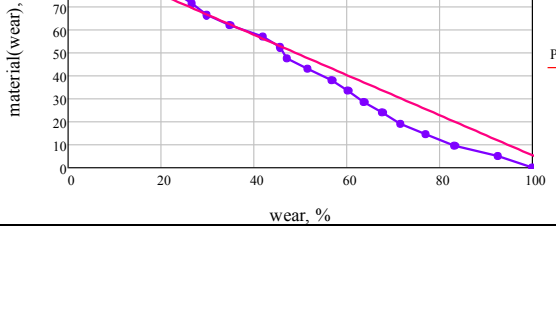
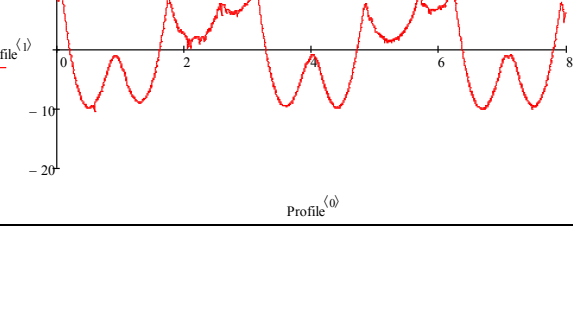
Координати для формування мікрорельєфу Туре III на верстаті ТМ-1

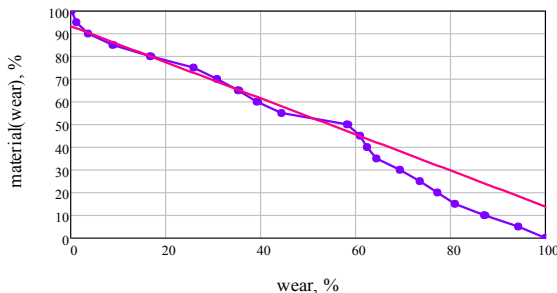
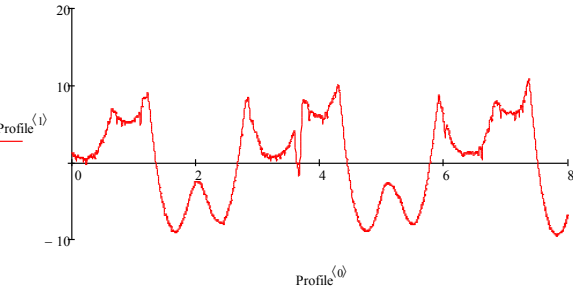
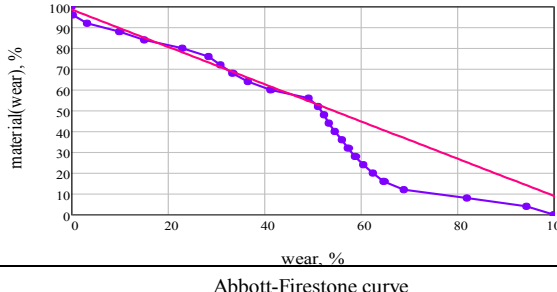
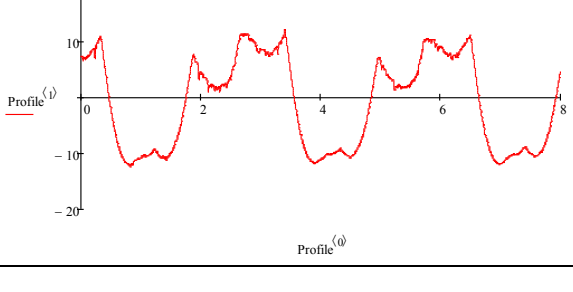
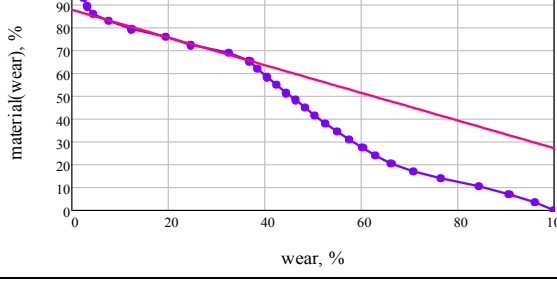
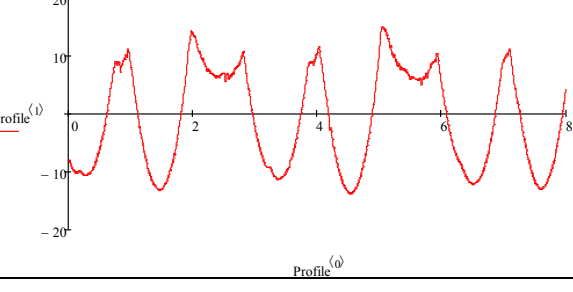
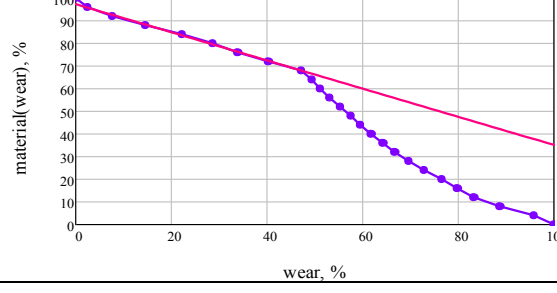
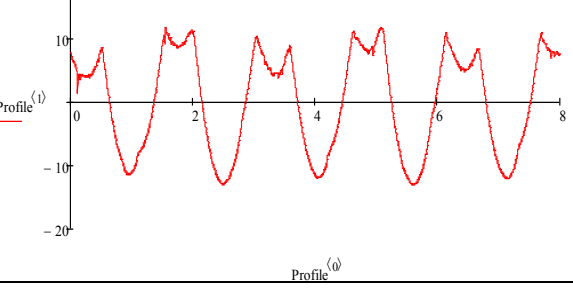
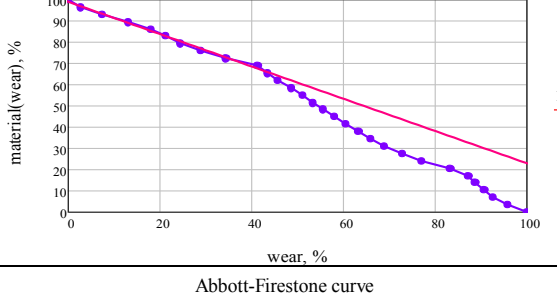
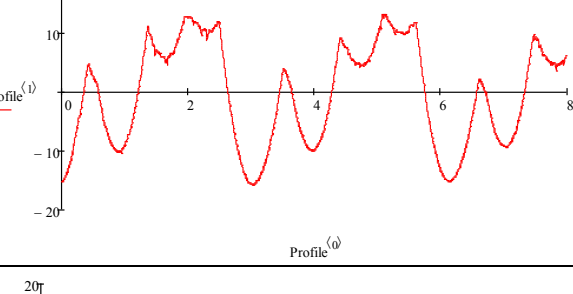
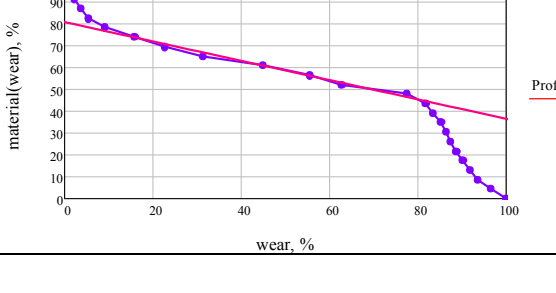
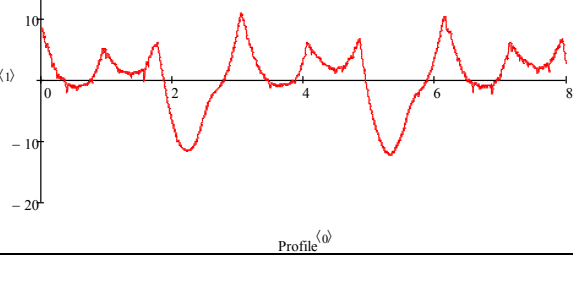
| 14 | | 12 | | 10 | | 8 | | 6 | | 4 | | 2 | | 1 | | 3 | | 5 | | 7 | | 9 | | 11 | | 13 | | 15 | | | |
|-------|------|----|-----|----|------|---|---|---|------|---|-----|---|------|---|----|---|-------|---|------|---|-------|---|----|----|-------|----|------|----|-------|---|---|
| X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
| 5.00 | 8.75 | | 7.5 | | 6.25 | | 5 | | 3.75 | | 2.5 | | 1.25 | | 0 | | -1.50 | | -2.5 | | -3.75 | | -5 | | -6.25 | | -7.5 | | -8.75 | | |
| 5.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 7.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 8.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 10.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 11.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 13.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 14.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 16.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 17.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 19.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 20.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 22.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 23.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 25.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 26.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 28.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 29.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 31.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 32.75 | 9.75 | | 8.5 | | 7.25 | | 6 | | 2.75 | | 3.5 | | 0.25 | | 1 | | -2.25 | | -1.5 | | -4.75 | | -4 | | -5.25 | | -6.5 | | -7.75 | | |
| 34.25 | 7.75 | | 6.5 | | 5.25 | | 4 | | 4.75 | | 1.5 | | 2.25 | | -1 | | -0.25 | | -3.5 | | -2.75 | | -6 | | -7.25 | | -8.5 | | -9.75 | | |
| 35.00 | 8.75 | | 7.5 | | 6.25 | | 5 | | 3.75 | | 2.5 | | 1.25 | | 0 | | -1.50 | | -2.5 | | -3.75 | | -5 | | -6.25 | | -7.5 | | -8.75 | | |

| № | Type of Deformation | Feed rate. $f_{in.i.}$ mm/min | | |
|---|---------------------|-------------------------------|-----|--|
| 1 | I | 400 | 500 | |
| 2 | I | 400 | 500 | |
| 3 | I | 400 | 500 | |
| 4 | I | 400 | 500 | |
| 5 | I | 400 | 500 | |

| | | | | | |
|----|---|-----|------|--|--|
| 6 | I | 400 | 1000 | | |
| 7 | I | 400 | 1000 | | |
| 8 | I | 400 | 1000 | | |
| 9 | I | 400 | 1000 | | |
| 10 | I | 400 | 1000 | | |
| 11 | I | 400 | 1500 | | |

| | | | | | |
|----|----|-----|------|--|--|
| 12 | I | 400 | 1500 | | |
| 13 | I | 400 | 1500 | | |
| 14 | I | 400 | 1500 | | |
| 15 | I | 400 | 1500 | | |
| 16 | II | 400 | 500 | | |
| 17 | II | 400 | 500 | | |

| | | | | |
|----|----|-----|------|--|
| 18 | II | 400 | 500 |   |
| 19 | II | 400 | 500 |   |
| 20 | II | 400 | 500 |   |
| 21 | II | 400 | 1000 |   |
| 22 | II | 400 | 1000 |   |
| 23 | II | 400 | 1000 |   |

| | | | | |
|----|----|-----|------|--|
| 24 | II | 400 | 1000 | <p>Abbott-Firestone curve</p>   |
| 25 | II | 400 | 1000 | <p>Abbott-Firestone curve</p>   |
| 26 | II | 400 | 1500 | <p>Abbott-Firestone curve</p>   |
| 27 | II | 400 | 1500 | <p>Abbott-Firestone curve</p>   |
| 28 | II | 400 | 1500 | <p>Abbott-Firestone curve</p>   |
| 29 | II | 400 | 1500 | <p>Abbott-Firestone curve</p>   |

| | | | | | |
|----|-----|-----|------|-------------------------------|--|
| 30 | II | 400 | 1500 | <p>Abbott-Firestone curve</p> | |
| 31 | III | 400 | 500 | <p>Abbott-Firestone curve</p> | |
| 32 | III | 400 | 500 | <p>Abbott-Firestone curve</p> | |
| 33 | III | 400 | 500 | <p>Abbott-Firestone curve</p> | |
| 34 | III | 400 | 500 | <p>Abbott-Firestone curve</p> | |
| 35 | III | 400 | 500 | <p>Abbott-Firestone curve</p> | |

| | | | | |
|----|-----|-----|------|--|
| 36 | III | 400 | 1000 | |
| 37 | III | 400 | 1000 | |
| 38 | III | 400 | 1000 | |
| 39 | III | 400 | 1000 | |
| 40 | III | 400 | 1000 | |
| 41 | III | 400 | 1500 | |

| | | | | | |
|----|-----|-----|------|--|--|
| 42 | III | 400 | 1500 | | |
| 43 | III | 400 | 1500 | | |
| 44 | III | 400 | 1500 | | |
| 45 | III | 400 | 1500 | | |

General Factorial Regression: HV0.05-p1 versus RMR type; Feedrate**Factor Information**

| Factor | Levels | Values |
|----------|--------|-----------------|
| RMR type | 3 | I; II; III |
| Feedrate | 3 | 500; 1000; 1500 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--------------------|----|--------|--------------|--------|--------|---------|---------|
| Model | 8 | 15736 | 83.34% | 15736 | 1967.0 | 11.25 | 0.000 |
| Linear | 4 | 4355 | 23.06% | 4355 | 1088.7 | 6.23 | 0.003 |
| RMR type | 2 | 2181 | 11.55% | 2181 | 1090.7 | 6.24 | 0.009 |
| Feedrate | 2 | 2173 | 11.51% | 2173 | 1086.7 | 6.22 | 0.009 |
| 2-Way Interactions | 4 | 11381 | 60.28% | 11381 | 2845.3 | 16.28 | 0.000 |
| RMR type*Feedrate | 4 | 11381 | 60.28% | 11381 | 2845.3 | 16.28 | 0.000 |
| Error | 18 | 3146 | 16.66% | 3146 | 174.8 | | |
| Total | 26 | 18882 | 100.00% | | | | |

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | PRESS | R-sq(pred) | AICc | BIC |
|---------|--------|-----------|--------|------------|--------|--------|
| 13.2204 | 83.34% | 75.93% | 7078.5 | 62.51% | 238.84 | 238.05 |

Coefficients

| Term | Coef | SE Coef | 95% CI | T-Value | P-Value | VIF |
|----------|--------|---------|------------------|---------|---------|------|
| Constant | 347.81 | 2.54 | (342.47; 353.16) | 136.71 | 0.000 | |
| RMR type | | | | | | |
| I | -10.26 | 3.60 | (-17.82; -2.70) | -2.85 | 0.011 | 1.33 |
| II | 11.63 | 3.60 | (4.07; 19.19) | 3.23 | 0.005 | 1.33 |
| Feedrate | | | | | | |
| 500 | 12.63 | 3.60 | (5.07; 20.19) | 3.51 | 0.003 | 1.33 |

| | | | | | | |
|-------------------|-------|------|----------------|-------|-------|------|
| 1000 | -5.26 | 3.60 | (-12.82; 2.30) | -1.46 | 0.161 | 1.33 |
| RMR type*Feedrate | | | | | | |
| I 500 | 4.15 | 5.09 | (-6.54; 14.84) | 0.82 | 0.426 | 1.78 |
| I 1000 | 29.37 | 5.09 | (18.68; 40.06) | 5.77 | 0.000 | 1.78 |
| II 500 | 4.93 | 5.09 | (-5.76; 15.62) | 0.97 | 0.346 | 1.78 |
| II 1000 | -5.52 | 5.09 | (-16.21; 5.17) | -1.08 | 0.292 | 1.78 |

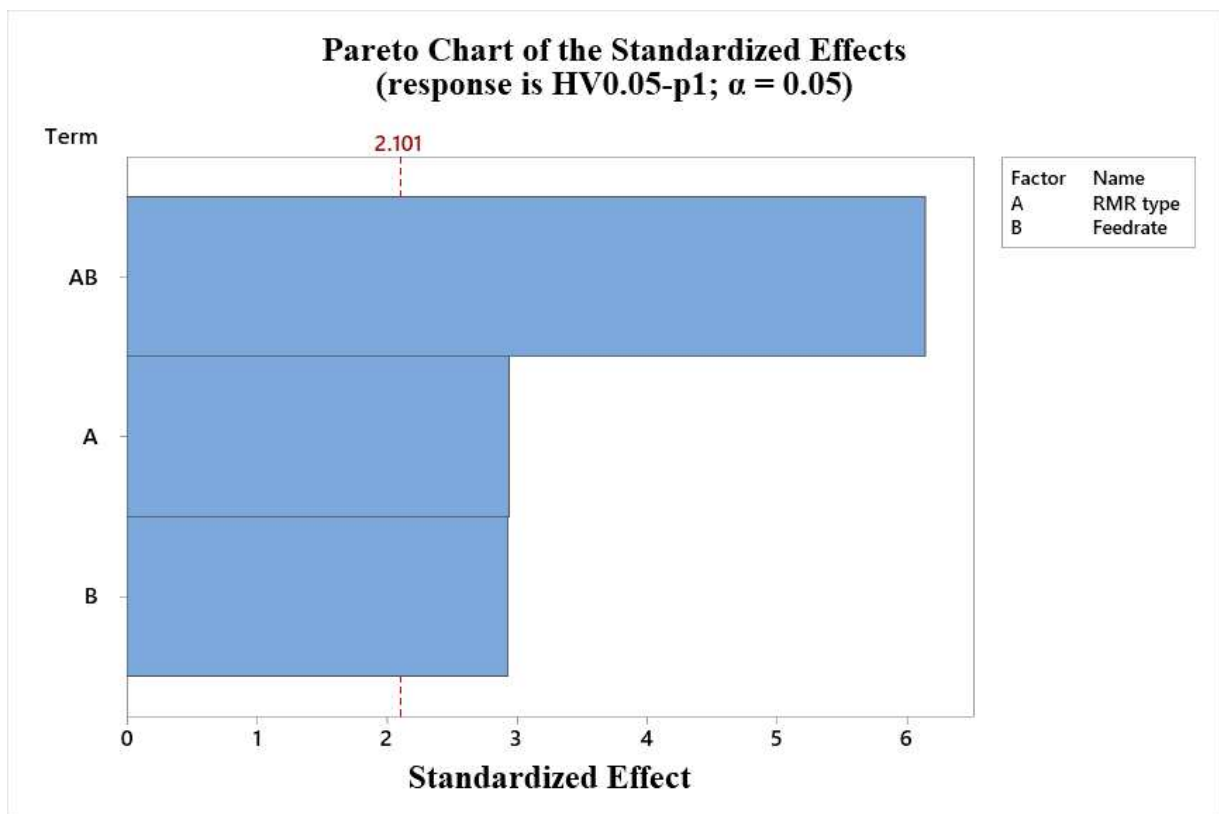
Regression Equation

| | |
|-------------|--|
| HV0.05-p1 = | 347.81 - 10.26 RMR type_I + 11.63 RMR type_II - 1.37 RMR type_III + 12.63 Feedrate_500 - 5.26 Feedrate_1000 - 7.37 Feedrate_1500 + 4.15 RMR type*Feedrate_I 500 + 29.37 RMR type*Feedrate_I 1000 - 33.52 RMR type*Feedrate_I 1500 + 4.93 RMR type*Feedrate_II 500 - 5.52 RMR type*Feedrate_II 1000 + 0.59 RMR type*Feedrate_II 1500 - 9.07 RMR type*Feedrate_III 500 - 23.85 RMR type*Feedrate_III 1000 + 32.93 RMR type*Feedrate_III 1500 |
|-------------|--|

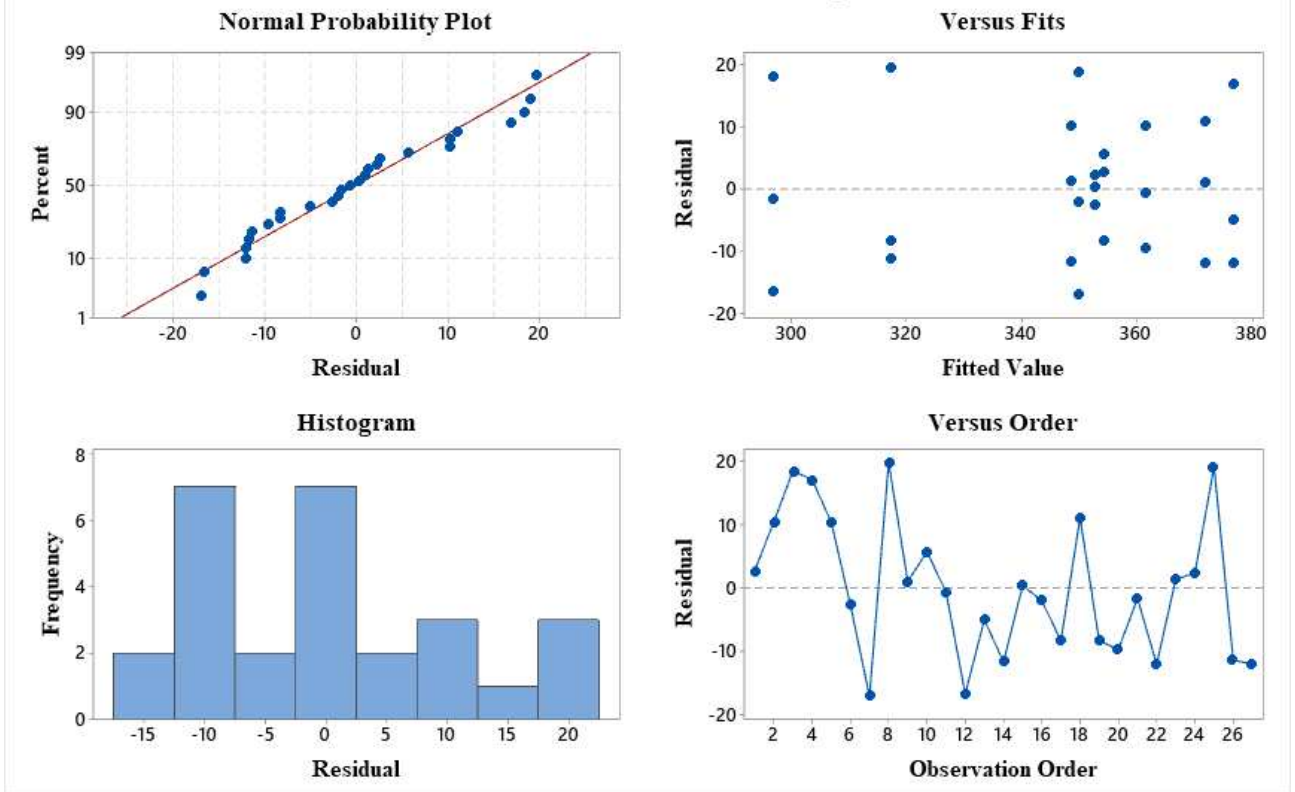
Fits and Diagnostics for All Observations

| Obs | HV0.05-p1 | Fit | SE Fit | 95% CI | Resid | Std Resid | Del Resid | HI |
|-----|-----------|--------|--------|------------------|--------|-----------|-----------|----------|
| 1 | 357.00 | 354.33 | 7.63 | (338.30; 370.37) | 2.67 | 0.25 | 0.24 | 0.333333 |
| 2 | 372.00 | 361.67 | 7.63 | (345.63; 377.70) | 10.33 | 0.96 | 0.95 | 0.333333 |
| 3 | 315.00 | 296.67 | 7.63 | (280.63; 312.70) | 18.33 | 1.70 | 1.80 | 0.333333 |
| 4 | 394.00 | 377.00 | 7.63 | (360.96; 393.04) | 17.00 | 1.57 | 1.65 | 0.333333 |
| 5 | 359.00 | 348.67 | 7.63 | (332.63; 364.70) | 10.33 | 0.96 | 0.95 | 0.333333 |
| 6 | 350.00 | 352.67 | 7.63 | (336.63; 368.70) | -2.67 | -0.25 | -0.24 | 0.333333 |
| 7 | 333.00 | 350.00 | 7.63 | (333.96; 366.04) | -17.00 | -1.57 | -1.65 | 0.333333 |
| 8 | 337.00 | 317.33 | 7.63 | (301.30; 333.37) | 19.67 | 1.82 | 1.96 | 0.333333 |
| 9 | 373.00 | 372.00 | 7.63 | (355.96; 388.04) | 1.00 | 0.09 | 0.09 | 0.333333 |
| 10 | 360.00 | 354.33 | 7.63 | (338.30; 370.37) | 5.67 | 0.52 | 0.51 | 0.333333 |
| 11 | 361.00 | 361.67 | 7.63 | (345.63; 377.70) | -0.67 | -0.06 | -0.06 | 0.333333 |
| 12 | 280.00 | 296.67 | 7.63 | (280.63; 312.70) | -16.67 | -1.54 | -1.61 | 0.333333 |
| 13 | 372.00 | 377.00 | 7.63 | (360.96; 393.04) | -5.00 | -0.46 | -0.45 | 0.333333 |
| 14 | 337.00 | 348.67 | 7.63 | (332.63; 364.70) | -11.67 | -1.08 | -1.09 | 0.333333 |
| 15 | 353.00 | 352.67 | 7.63 | (336.63; 368.70) | 0.33 | 0.03 | 0.03 | 0.333333 |

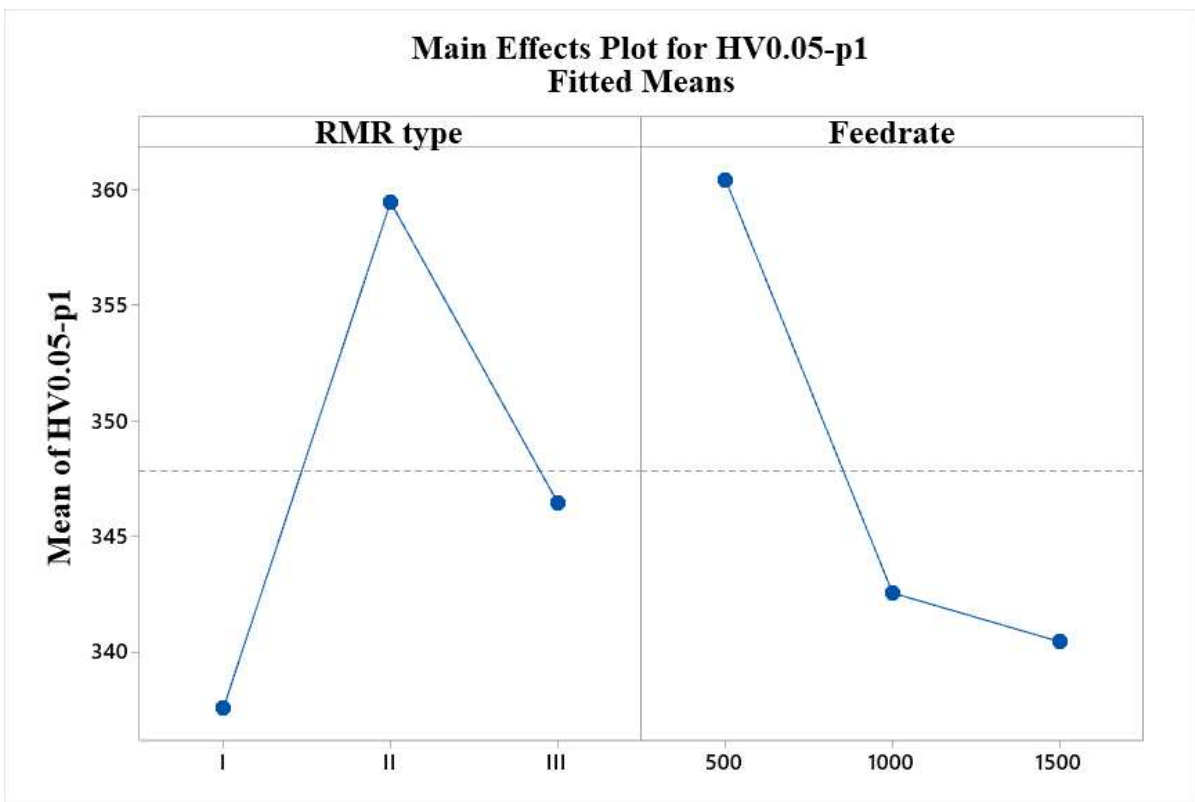
| | | | | | | | | |
|----|--------|--------|------|------------------|--------|-------|-------|----------|
| 16 | 348.00 | 350.00 | 7.63 | (333.96; 366.04) | -2.00 | -0.19 | -0.18 | 0.333333 |
| 17 | 309.00 | 317.33 | 7.63 | (301.30; 333.37) | -8.33 | -0.77 | -0.76 | 0.333333 |
| 18 | 383.00 | 372.00 | 7.63 | (355.96; 388.04) | 11.00 | 1.02 | 1.02 | 0.333333 |
| 19 | 346.00 | 354.33 | 7.63 | (338.30; 370.37) | -8.33 | -0.77 | -0.76 | 0.333333 |
| 20 | 352.00 | 361.67 | 7.63 | (345.63; 377.70) | -9.67 | -0.90 | -0.89 | 0.333333 |
| 21 | 295.00 | 296.67 | 7.63 | (280.63; 312.70) | -1.67 | -0.15 | -0.15 | 0.333333 |
| 22 | 365.00 | 377.00 | 7.63 | (360.96; 393.04) | -12.00 | -1.11 | -1.12 | 0.333333 |
| 23 | 350.00 | 348.67 | 7.63 | (332.63; 364.70) | 1.33 | 0.12 | 0.12 | 0.333333 |
| 24 | 355.00 | 352.67 | 7.63 | (336.63; 368.70) | 2.33 | 0.22 | 0.21 | 0.333333 |
| 25 | 369.00 | 350.00 | 7.63 | (333.96; 366.04) | 19.00 | 1.76 | 1.88 | 0.333333 |
| 26 | 306.00 | 317.33 | 7.63 | (301.30; 333.37) | -11.33 | -1.05 | -1.05 | 0.333333 |
| 27 | 360.00 | 372.00 | 7.63 | (355.96; 388.04) | -12.00 | -1.11 | -1.12 | 0.333333 |



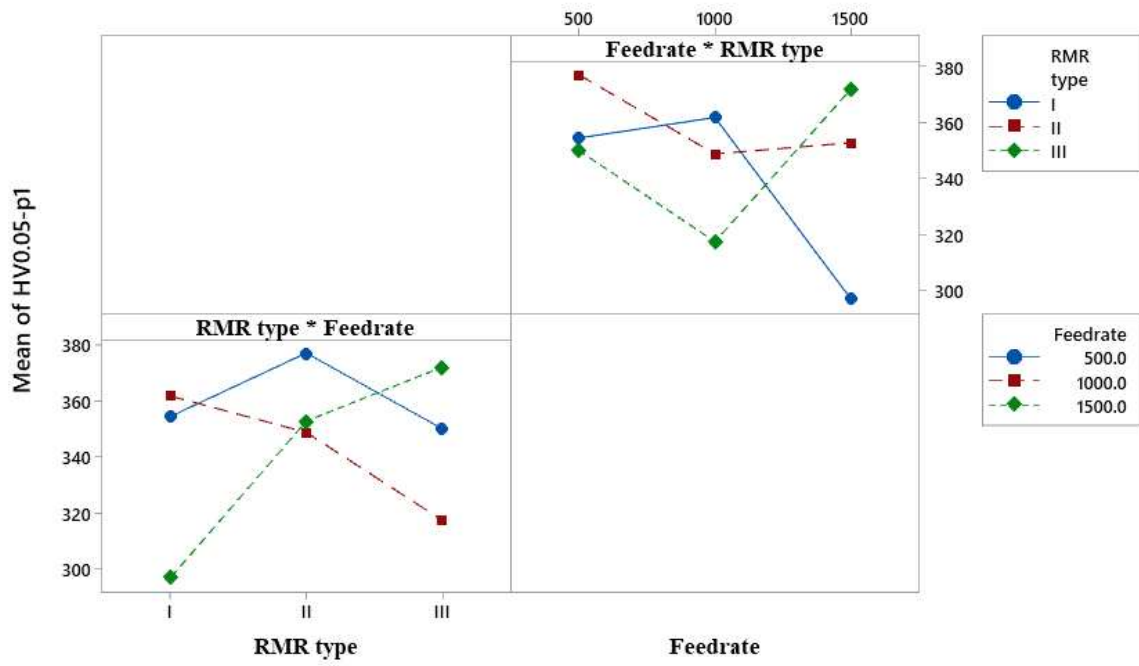
Residual Plots for HV0.05-p1



Factorial Plots for HV0.05-p1



Interaction Plot for HV0.05-p1 Fitted Means



General Factorial Regression: HV0.05-p2 versus RMR type; Feedrate

Factor Information

| Factor | Levels | Values |
|----------|--------|-----------------|
| RMR type | 3 | I; II; III |
| Feedrate | 3 | 500; 1000; 1500 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--------------------|----|--------|--------------|--------|--------|---------|---------|
| Model | 8 | 24237 | 82.52% | 24237 | 3029.7 | 10.62 | 0.000 |
| Linear | 4 | 21663 | 73.75% | 21663 | 5415.7 | 18.98 | 0.000 |
| RMR type | 2 | 12625 | 42.98% | 12625 | 6312.4 | 22.13 | 0.000 |
| Feedrate | 2 | 9038 | 30.77% | 9038 | 4519.0 | 15.84 | 0.000 |
| 2-Way Interactions | 4 | 2574 | 8.76% | 2574 | 643.6 | 2.26 | 0.103 |
| RMR type*Feedrate | 4 | 2574 | 8.76% | 2574 | 643.6 | 2.26 | 0.103 |
| Error | 18 | 5135 | 17.48% | 5135 | 285.3 | | |
| Total | 26 | 29373 | 100.00% | | | | |

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | PRESS | R-sq(pred) | AICc | BIC |
|---------|--------|-----------|---------|------------|--------|--------|
| 16.8907 | 82.52% | 74.75% | 11554.5 | 60.66% | 252.07 | 251.28 |

Coefficients

| Term | Coef | SE Coef | 95% CI | T-Value | P-Value | VIF |
|-------------------|--------|---------|------------------|---------|---------|------|
| Constant | 300.22 | 3.25 | (293.39; 307.05) | 92.36 | 0.000 | |
| RMR type | | | | | | |
| I | 6.44 | 4.60 | (-3.21; 16.10) | 1.40 | 0.178 | 1.33 |
| II | 22.67 | 4.60 | (13.01; 32.32) | 4.93 | 0.000 | 1.33 |
| Feedrate | | | | | | |
| 500 | 25.67 | 4.60 | (16.01; 35.32) | 5.58 | 0.000 | 1.33 |
| 1000 | -10.00 | 4.60 | (-19.66; -0.34) | -2.18 | 0.043 | 1.33 |
| RMR type*Feedrate | | | | | | |

| | | | | | | |
|---------|--------|------|----------------|-------|-------|------|
| I 500 | -10.00 | 6.50 | (-23.66; 3.66) | -1.54 | 0.141 | 1.78 |
| I 1000 | 17.67 | 6.50 | (4.01; 31.33) | 2.72 | 0.014 | 1.78 |
| II 500 | 12.11 | 6.50 | (-1.55; 25.77) | 1.86 | 0.079 | 1.78 |
| II 1000 | -12.56 | 6.50 | (-26.21; 1.10) | -1.93 | 0.069 | 1.78 |

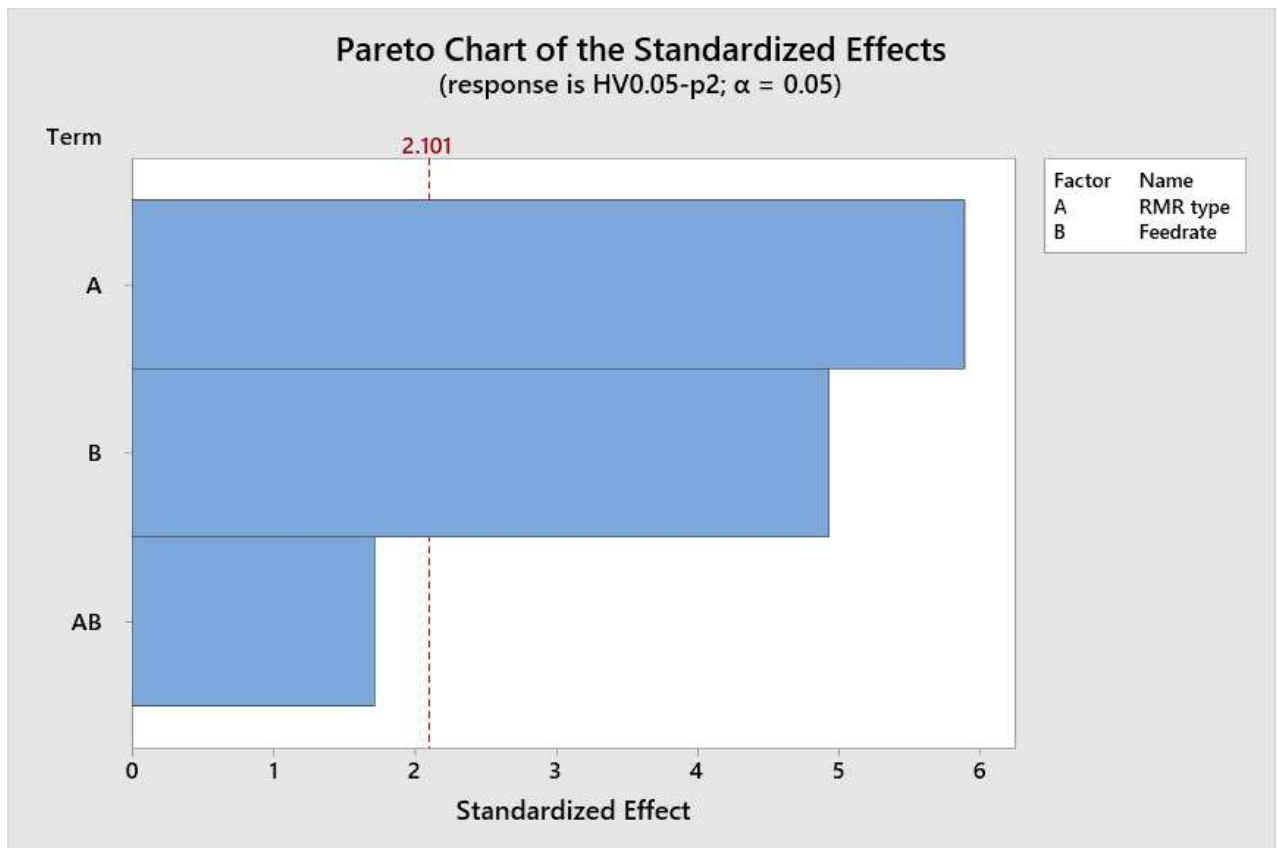
Regression Equation

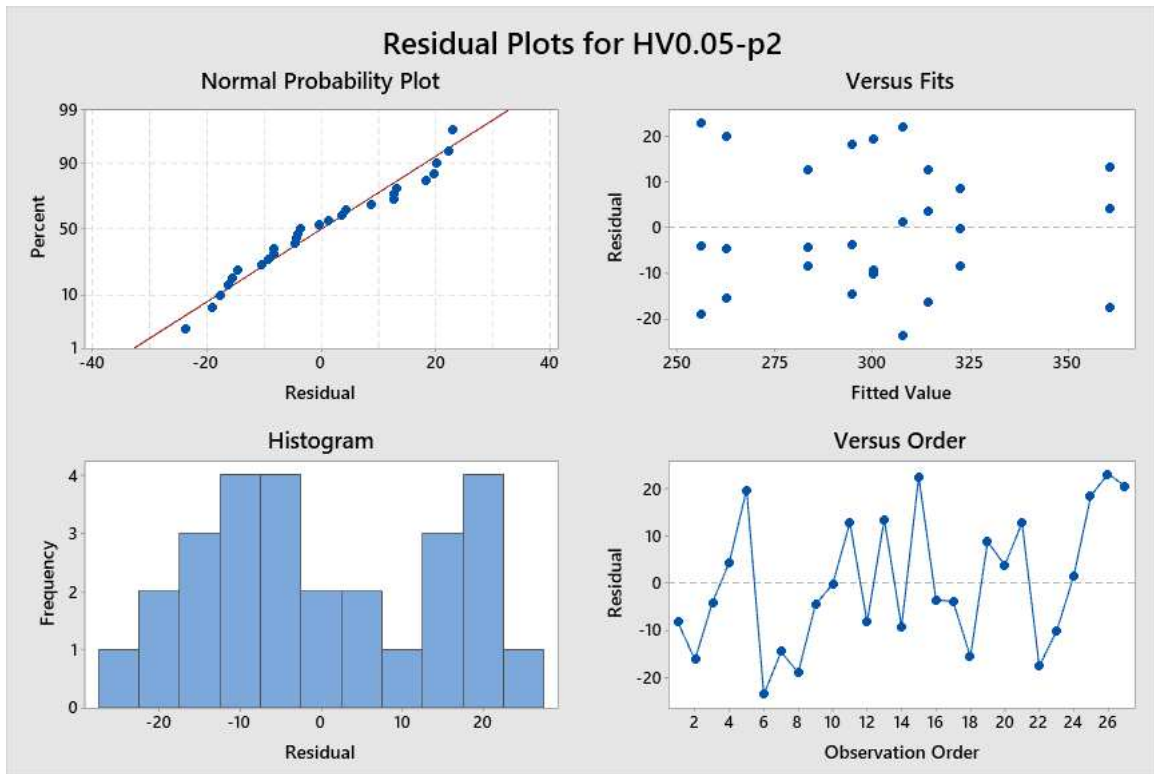
$$\begin{aligned}
 \text{HV0.05-p2} = & 300.22 + 6.44 \text{ RMR type_I} + 22.67 \text{ RMR type_II} - 29.11 \text{ RMR type_III} \\
 & + 25.67 \text{ Feedrate_500} - 10.00 \text{ Feedrate_1000} - 15.67 \text{ Feedrate_1500} \\
 & - 10.00 \text{ RMR type*Feedrate_I 500} + 17.67 \text{ RMR type*Feedrate_I 1000} \\
 & - 7.67 \text{ RMR type*Feedrate_I 1500} + 12.11 \text{ RMR type*Feedrate_II 500} \\
 & - 12.56 \text{ RMR type*Feedrate_II 1000} + 0.44 \text{ RMR type*Feedrate_II 1500} \\
 & - 2.11 \text{ RMR type*Feedrate_III 500} - 5.11 \text{ RMR type*Feedrate_III 1000} \\
 & + 7.22 \text{ RMR type*Feedrate_III 1500}
 \end{aligned}$$

Fits and Diagnostics for All Observations

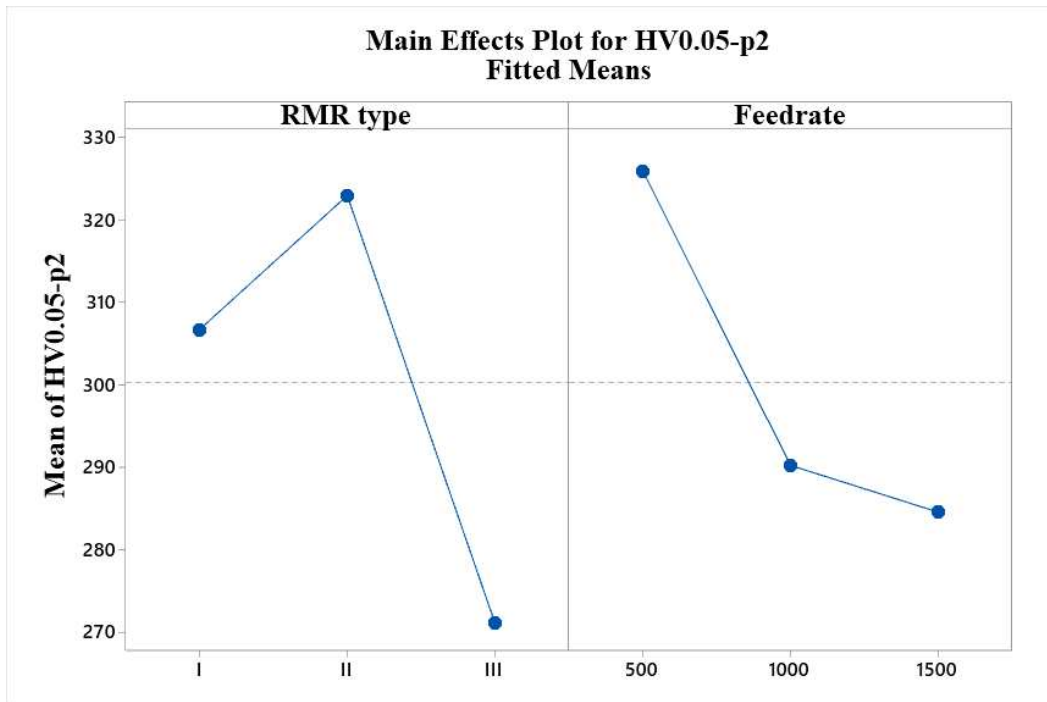
| Obs | HV0.05-p2 | Fit | SE Fit | 95% CI | Resid | Std Resid | Del Resid | HI |
|-----|-----------|--------|--------|------------------|--------|-----------|-----------|----------|
| 1 | 314.00 | 322.33 | 9.75 | (301.85; 342.82) | -8.33 | -0.60 | -0.59 | 0.333333 |
| 2 | 298.00 | 314.33 | 9.75 | (293.85; 334.82) | -16.33 | -1.18 | -1.20 | 0.333333 |
| 3 | 279.00 | 283.33 | 9.75 | (262.85; 303.82) | -4.33 | -0.31 | -0.31 | 0.333333 |
| 4 | 365.00 | 360.67 | 9.75 | (340.18; 381.15) | 4.33 | 0.31 | 0.31 | 0.333333 |
| 5 | 320.00 | 300.33 | 9.75 | (279.85; 320.82) | 19.67 | 1.43 | 1.47 | 0.333333 |
| 6 | 284.00 | 307.67 | 9.75 | (287.18; 328.15) | -23.67 | -1.72 | -1.82 | 0.333333 |
| 7 | 280.00 | 294.67 | 9.75 | (274.18; 315.15) | -14.67 | -1.06 | -1.07 | 0.333333 |
| 8 | 237.00 | 256.00 | 9.75 | (235.51; 276.49) | -19.00 | -1.38 | -1.42 | 0.333333 |
| 9 | 258.00 | 262.67 | 9.75 | (242.18; 283.15) | -4.67 | -0.34 | -0.33 | 0.333333 |
| 10 | 322.00 | 322.33 | 9.75 | (301.85; 342.82) | -0.33 | -0.02 | -0.02 | 0.333333 |
| 11 | 327.00 | 314.33 | 9.75 | (293.85; 334.82) | 12.67 | 0.92 | 0.91 | 0.333333 |
| 12 | 275.00 | 283.33 | 9.75 | (262.85; 303.82) | -8.33 | -0.60 | -0.59 | 0.333333 |
| 13 | 374.00 | 360.67 | 9.75 | (340.18; 381.15) | 13.33 | 0.97 | 0.96 | 0.333333 |
| 14 | 291.00 | 300.33 | 9.75 | (279.85; 320.82) | -9.33 | -0.68 | -0.67 | 0.333333 |
| 15 | 330.00 | 307.67 | 9.75 | (287.18; 328.15) | 22.33 | 1.62 | 1.70 | 0.333333 |
| 16 | 291.00 | 294.67 | 9.75 | (274.18; 315.15) | -3.67 | -0.27 | -0.26 | 0.333333 |
| 17 | 252.00 | 256.00 | 9.75 | (235.51; 276.49) | -4.00 | -0.29 | -0.28 | 0.333333 |

| | | | | | | | | |
|----|--------|--------|------|------------------|--------|-------|-------|----------|
| 18 | 247.00 | 262.67 | 9.75 | (242.18; 283.15) | -15.67 | -1.14 | -1.15 | 0.333333 |
| 19 | 331.00 | 322.33 | 9.75 | (301.85; 342.82) | 8.67 | 0.63 | 0.62 | 0.333333 |
| 20 | 318.00 | 314.33 | 9.75 | (293.85; 334.82) | 3.67 | 0.27 | 0.26 | 0.333333 |
| 21 | 296.00 | 283.33 | 9.75 | (262.85; 303.82) | 12.67 | 0.92 | 0.91 | 0.333333 |
| 22 | 343.00 | 360.67 | 9.75 | (340.18; 381.15) | -17.67 | -1.28 | -1.31 | 0.333333 |
| 23 | 290.00 | 300.33 | 9.75 | (279.85; 320.82) | -10.33 | -0.75 | -0.74 | 0.333333 |
| 24 | 309.00 | 307.67 | 9.75 | (287.18; 328.15) | 1.33 | 0.10 | 0.09 | 0.333333 |
| 25 | 313.00 | 294.67 | 9.75 | (274.18; 315.15) | 18.33 | 1.33 | 1.36 | 0.333333 |
| 26 | 279.00 | 256.00 | 9.75 | (235.51; 276.49) | 23.00 | 1.67 | 1.76 | 0.333333 |
| 27 | 283.00 | 262.67 | 9.75 | (242.18; 283.15) | 20.33 | 1.47 | 1.53 | 0.333333 |

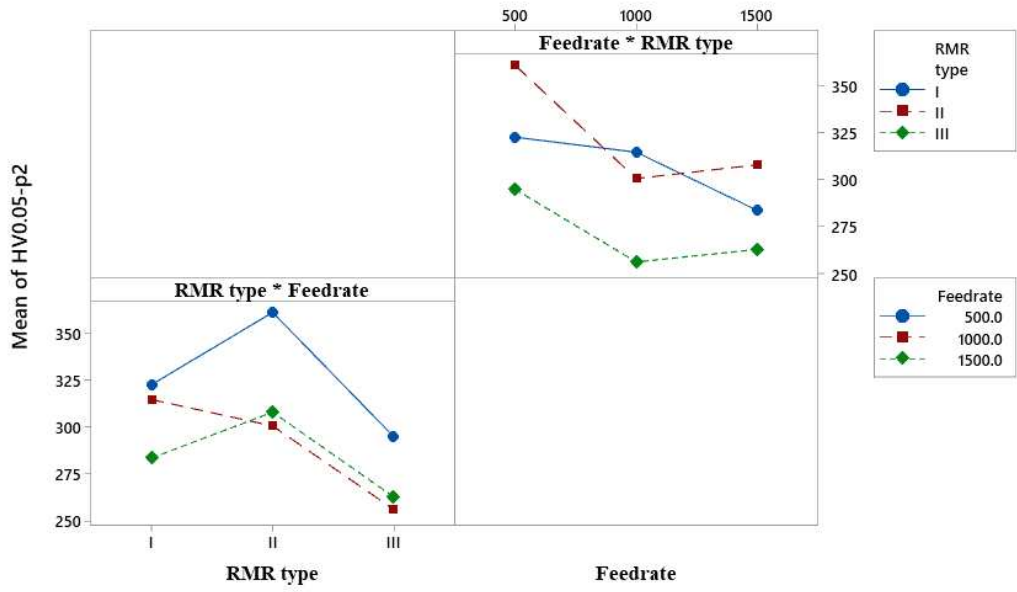




Factorial Plots for HV0.05-p2



Interaction Plot for HV0.05-p2 Fitted Means







УКРАЇНА

(19) UA (11) 153223 (13) U

(51) МПК (2023.01)

B23P 9/00

B24B 1/00

B24B 39/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

| | |
|---|--|
| <p>(21) Номер заявки: u 2022 03830</p> <p>(22) Дата подання заявки: 13.10.2022</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 08.06.2023</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 07.06.2023, Бюл.№ 23</p> | <p>(72) Винахідник(и): Дзюра Володимир Олексійович (UA), Марущак Павло Орестович (UA), Семенген Володимир Олегович (UA), Палюх Андрій Ярославович (UA), Марущак Олена Володимирівна (UA), Ціцюра Олена Ігорівна (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</p> |
|---|--|

(54) СПОСІБ ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ НА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНЯХ ВІБРАЦІЙНИМ ОБКОЧУВАННЯМ**(57) Реферат:**

Спосіб формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обкочуванням, при якому деформувальним елементам - кулькам, надають основний поступальний рух подачі і додатково цим деформувальним елементам надають зворотно-поступальний осциляційний рух з амплітудою 2-4 мм і частотою близько 1000 подвійних ходів на хвилину, причому напрям зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярний напрямку руху подачі. Перед формуванням регулярних мікрорельєфів з оброблюваної поверхні знімають профілограми і при цьому визначають значення параметра шорсткості - максимальної висоти нерівностей $R_{a_{max}}$, і приймають, що розподіл цих величин підпорядковують нормальному закону розподілу. Після чого визначають характеристики розподілу випадкової величини $R_{a_{max}}$, а саме математичне сподівання $M(R_{a_{max}})$ і дисперсію $D(R_{a_{max}})$, і визначають максимальне вибіркове значення $R_{a_{max}^a} = M(R_{a_{max}}) + 3\sqrt{D(R_{a_{max}})}$. Після цього віброобкатнику - кульці, додатково надають осцилюючий рух у напрямку, перпендикулярному до напрямку подачі, із амплітудою $A_e = (1,5 - 1,2)R_{a_{max}^a}$ і необхідною частотою коливань.

UA 153223 U

Корисна модель належить до машинобудування, зокрема до процесів поверхневого пластичного деформування плоских поверхонь металевих виробів і формування регулярних мікрорельєфів, і може знайти широке застосування у технологічних процесах виготовлення високоякісних деталей машин з плоскими поверхнями.

Найближчим за технічною суттю і отримуваним результатом до заявленого є відомий спосіб віброобточування плоскої поверхні і формування при цьому регулярного мікрорельєфу, при якому деформувальним елементам — кулькам, надають основний поступальний рух подачі і додатково цим деформувальним елементам надають зворотно-поступальний осциляційний рух з амплітудою 2-4 мм і частотою близько 1000 подвійних ходів на хвилину, причому напрям зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярний напрямку руху подачі (Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. - 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Ю.Г. Шнейдер. - Л.: Машиностроение, 1982. - 248 с).

Недоліком найближчого за технічною суттю технічного рішення є те, що не обґрунтовані зусилля вібраційного обточування, які діють з сторони кульки на оброблювану поверхню, не забезпечена постійність обертання кульки внаслідок осциляційного її руху, що може призвести до її проковзування по оброблюваній поверхні, не враховані вихідні параметри шорсткості поверхні, яка підлягає вібраційному обробленню.

В основу корисної моделі поставлена задача вдосконалення способу формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях, у якому забезпечується зменшення зусилля віброобточування, покращення показників якості обробленої поверхні як за параметром шорсткості, так і за параметрами зміцнення.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обточуванням, який полягає у вібраційному обточуванні оброблюваної поверхні деформуючими елементами, наприклад кульками, яким надають основний поступальний осциляційний рух в напрямку подачі і додатково цим деформувальним елементам надають зворотно-поступальний рух з амплітудою 2-4 мм і частотою близько 1000 подвійних ходів на хвилину, причому напрям зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярний осі руху подачі, згідно з корисною моделлю перед формуванням регулярних мікрорельєфів з оброблюваної поверхні знімають профілограми, при цьому визначають значення параметра шорсткості - максимальної висоти нерівностей $R_{a_{i_{max}}}$, і приймають, що

розподіл цих величин підпорядковують нормальному закону розподілу, після чого визначають характеристики розподілу випадкової величини $R_{a_{i_{max}}}$, а саме математичне сподівання $M(R_{a_{i_{max}}})$

і дисперсію $D(R_{a_{i_{max}}})$, і визначають максимальне вибіркове значення $R_{a_{max}^e} = M(R_{a_{i_{max}}}) + 3\sqrt{D(R_{a_{i_{max}}})}$,

після цього віброобкатнику - кульці, додатково надають осциляційний рух у напрямку, перпендикулярному до напрямку подачі із амплітудою $A_e = (1,5 - 1,2)R_{a_{max}^e}$ і необхідною частотою коливань.

На фіг. 1 - зображено фронтальну проєкцію принципової схеми формування регулярних мікрорельєфів на плоскій поверхні.

На фіг. 2 - вигляд по А на фіг. 1.

На фіг. 3 - вигляд по Б на фіг. 1.

Спосіб реалізується наступним чином.

Деформувальним елементам - кулькам 1, надають основний поступальний рух подачі і додатково цим деформувальним елементам 1 надають зворотно-поступальний осциляційний рух з амплітудою 2-4 мм і частотою близько 1000 подвійних ходів на хвилину. Напрямок зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярний напрямку руху подачі.

Перед цим досліджують шорсткість оброблюваної поверхні заготовки 2. З оброблюваної поверхні 3 на базовій довжині l перпендикулярно до слідів оброблення на попередньому переході (фіг. 1) знімають не менше 10 профілограм ($i=1,2,3, \dots, 10$) і на кожній з них визначають параметр шорсткості - максимальну висоту профілю $R_{a_{i_{max}}}$. Приймають відповідність

розсіювання величин $R_{a_{i_{max}}}$ нормальному закону розподілу. За методом ітерацій для вибірки обсягом 10 значень $R_{a_{i_{max}}}$ визначають характеристики розподілу величини $R_{a_{max}^e}$, а саме математичне сподівання $M(R_{a_{i_{max}}})$ і дисперсію $D(R_{a_{i_{max}}})$, і визначають максимальне вибіркове значення $R_{a_{max}^e} = M(R_{a_{i_{max}}}) + 3\sqrt{D(R_{a_{i_{max}}})}$.

Після цього заготовку 2 з оброблюваною поверхнею 3 встановлюють і закріплюють на столі 4 верстата (на фіг. не показано). Стіл 4 переміщують вгору, доводять до контакту оброблювану поверхню з деформувальним елементом 1 – кулькою, і стискають пружний елемент - пружину стиснення 5, тим самим забезпечуючи необхідне зусилля F вібраційного обточування. Після цього деформувальному елементу 1 надають високочастотний осциляційний рух D_t в напрямку, перпендикулярному до оброблюваної поверхні 3 з величиною $A_e = (1,5 - 1,2)R_{a_{max}}$ і частотою S_k . Разом з цим деформуючому елементу 1 надають горизонтальний зворотно-поступальний осциляційний рух D_h і рух повздовжньої подачі $D_{s_{na}}$. При досягненні кулькою 1 лівого крайнього положення заготовки і виходу її із контакту з оброблюваною поверхнею 3 заготовки 2 всі механічні рухи відключають, заготовку виставляють по лівому її краю у вихідне положення, вибираючи при цьому зазори і продовжують процес.

Спосіб реалізується, наприклад, на широко універсальному інструментальному фрезерному верстаті моделі 676, у якого повздовжня подача кінематично зв'язана з обертовим рухом шпинделя.

Деформувальним елементам - кулькам 1, з діаметром 3 мм надають основний поступальний рух подачі в межах 0,25-0,5 м/хв і додатково цим деформувальним елементам надають зворотно-поступальний осциляційний рух з амплітудою 2-4 мм і частотою близько 1000 подвійних ходів на хвилину. Напрямок зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярний напрямку руху подачі.

Спочатку досліджують шорсткість оброблюваної поверхні заготовки 2. З оброблюваної поверхні 2 на базовій довжині l перпендикулярно до слідів оброблення на попередньому переході (фіг. 1) знімають не менше 10 профілограм R_{a_i} (i=1,2,3...10) і на кожній з них визначають параметр шорсткості - максимальну висоту профілю $R_{a_{i,max}}$ (табл.).

Таблиця

Значення параметра шорсткості - максимальної висоти профілю

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $R_{a_{i,max}}$ | 0,25 | 0,27 | 0,23 | 0,25 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,25 | 0,26 | 0,23 |

Приймають відповідність розсіювання величин $R_{a_{i,max}}$ нормальному закону розподілу. За методом ітерацій для вибірки обсягом 10 значень $R_{a_{i,max}}$ визначають характеристики розподілу величини $R_{a_{max}}$, а саме математичне сподівання $M(R_{a_{max}}) = 0,25$ і дисперсію $D(R_{a_{max}}) = 0,0125$ і визначають максимальне вибіркове значення $R_{a_{max}^p} = M(R_{a_{max}}) + 3\sqrt{D(R_{a_{max}})} = 0,58$.

Після цього заготовку 2 з оброблюваною поверхнею 3 встановлюють і закріплюють на столі 4 верстата (на фіг. не показано). Стіл 4 переміщують вгору, доводять до контакту оброблювану поверхню з деформуючим елементом - кулькою 1, і стискають пружний елемент - пружину стиснення 5, тим самим забезпечуючи необхідне зусилля F вібраційного обточування. Після цього деформуючому елементу 1 надають високочастотний осциляційний рух D_t в напрямку, перпендикулярному до оброблюваної поверхні 3 з величиною $A_e = (1,5 - 1,2)R_{a_{max}} = 0,87$ мм і частотою $S_k=4$ мм. Разом з цим деформуючому елементу 1 надають горизонтальний зворотно-поступальний осциляційний рух D_h і рух повздовжньої подачі $D_{s_{na}}$. При досягненні кулькою 1 лівого крайнього положення заготовки і виходу її із контакту з оброблюваною поверхнею 3 заготовки 2 всі механічні рухи відключають, заготовку виставляють по лівому її краю у вихідне положення, вибираючи при цьому зазори і продовжують процес.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

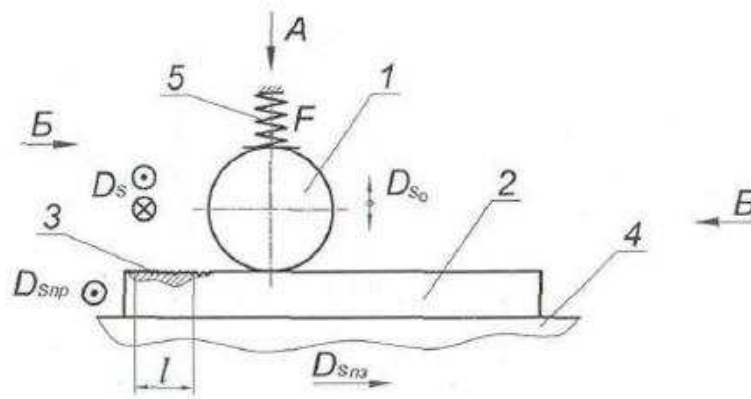
Спосіб формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обточуванням, при якому деформувальним елементам - кулькам, надають основний поступальний рух подачі і додатково деформувальним елементам надають зворотно-

поступальний осциляційний рух з амплітудою 2-4 мм і частотою близько 1000 подвійних ходів на хвилину, причому напрям зворотно-поступального осциляційного руху перпендикулярний напрямку руху подачі, який **відрізняється** тим, що перед формуванням регулярних мікрорельєфів з оброблюваної поверхні знімають профілограми і при цьому визначають

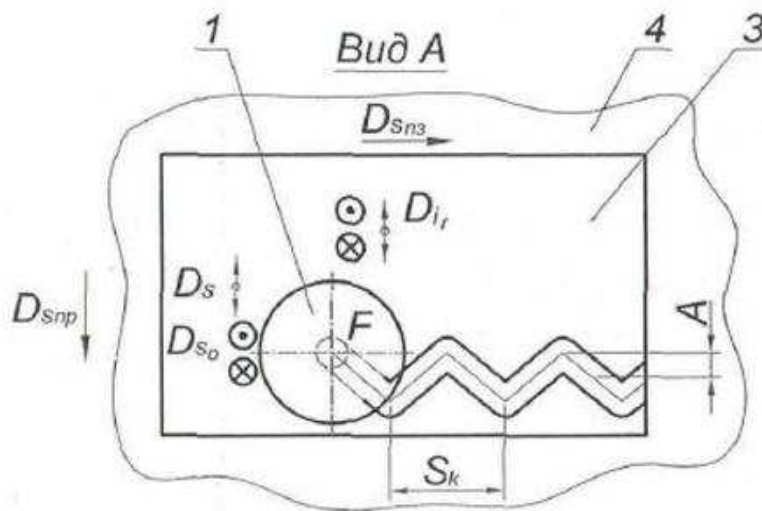
5 значення параметра шорсткості - максимальної висоти нерівностей $R_{a,max}$, і приймають, що розподіл цих величин підпорядковують нормальному закону розподілу, після чого визначають характеристики розподілу випадкової величини $R_{a,max}$, а саме математичне сподівання $M(R_{a,max})$

і дисперсію $D(R_{a,max})$, і визначають максимальне вибіркове значення $R_{a,max} = M(R_{a,max}) + 3\sqrt{D(R_{a,max})}$,

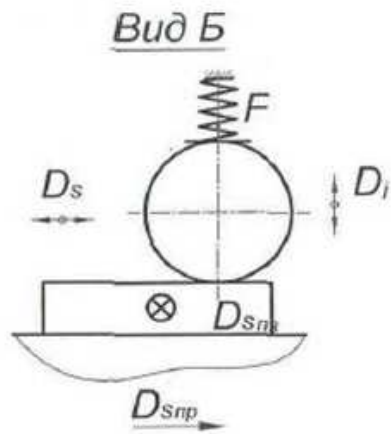
10 після цього віброобкатнику - кульці, додатково надають **осцилюючий** рух у напрямку, перпендикулярному до напрямку подачі, із амплітудою $A_e = (1,5 - 1,2)R_{a,max}$ і необхідною частотою коливань.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

ТОВАРИСТВО
З ДОДАТКОВОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
"БУЛАТ"



THE ADDITIONAL
LIABILITY COMPANY
"BULAT"

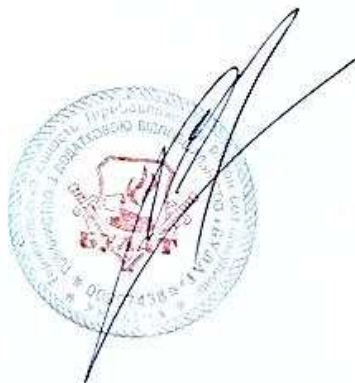
Юридична адреса:
48120, Україна, Тернопільська обл., смт. Микулинець,
вул. Тернопільська, 35
Телефони: +380-355-151-145,
тел./факс: +380-355-151-000

Address:
48120, 35 Ternopilska St, Mykulynsi, Ternopil region, Ukraine
Tel. +380 355 151-145
Fax. +380-355-151-000

Довідка

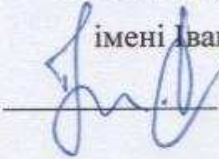
Видана про те, що методика розрахунку параметрів регулярних мікрорельєфів, сформованих на плоских поверхнях вібраційним обкатуванням розроблена Семеном В.О. в межах його дисертаційного дослідження була використана при формуванні регулярних мікрорельєфів на рухомих частинах обладнання для підвищення його експлуатаційної надійності та довговічності.

Директор



Ковальчук Олександр Віталійович

Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
технічного університету

імені Івана Пулюя

Павло МАРУЩАК

«27» 08 2025 року



Перший проректор
Тернопільського національного
технічного університету
імені Івана Пулюя
Олег ЛЯШУК

«27» 08 2025 року

Ми, які нижче підписалися, представники Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: керівник навчального відділу Ткаченко І.Г., завідувач кафедри автомобілів Цьонь О.П., професор кафедри автомобілів Дзюра В.О. склали цей акт про те, що в освітньому процесі підготовки здобувачів першого рівня вищої освіти за спеціальністю J8 «Автомобільний транспорт» у дисципліні «Автомобільні двигуни» в лекції «Конструкція і розрахунок кривошипно-шатунного механізму» використовуються наукові результати, отримані при виконанні дисертаційної роботи здобувача Семенга Володимира Олеговича, а саме – дослідження оптимальних параметрів частково регулярних мікрорельєфів при забезпеченні маслоємності поверхонь пар тертя (гільза-поршень; шатунний вкладиш-обойма).

Використання результатів наукової роботи в освітньому процесі сприяє більш широкому розумінню студентами перспективних напрямів підвищення експлуатаційних параметрів пар тертя двигунів внутрішнього згорання.

Голова комісії:

Керівник навчального відділу



Ігор ТКАЧЕНКО

Члени комісії:

Завідувач кафедри автомобілів



Олег ЦЬОНЬ

Професор кафедри автомобілів

Володимир ДЗЮРА

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, які відображають основні наукові результати дисертації

1. Dzyura V., Maruschak P., Slavov S., Dimitrov D., Semehen V., Markov O. Evaluating Some Functional Properties of Surfaces with Partially Regular Microreliefs Formed by Ball-Burnishing. *Machines*. 2023. Vol. 11. 633. DOI: 10.3390/machines11060633. (**Scopus Q2**) *(Здобувач провів аналіз геометричних параметрів дослідних зразків та встановив основні параметри мікрогеометрії поверхні).*

2. Dzyura V., Maruschak P., Semehen V., Kruk O., Gurey V. Analysis of Causes that Lead to Failure of Conical Discs of Variable Automatic Transmissions. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2024. DOI: 10.1007/s11668-024-01912-y (**Scopus Q3**) *(Здобувач провів розрахунок геометричних параметрів мікрорельєфу на поверхні диска варіатора).*

3. Slavov S. D., Dimitrov D. M., Mincheva D. Y., Dzyura V., Maruschak P., Semehen V. Microstructure and Microhardness Research of Steel 304 After Forming Partially Regular Reliefs by Ball Burnishing Operation. *Materials*. 2025. Vol. 18. 1565. DOI: 10.3390/ma18071565 (**Scopus Q2**) *(Здобувач провів аналіз результатів мікротвердості поверхні дослідних зразків та оцінював вплив окремих параметрів на мікротвердість).*

4. Дзюра В. О., Марущак П. О., Семеген В. О., Головка В. В., Федів В. Я. Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів, сформованих на плоских поверхнях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч. 1. С. 37–47. (**Фахове видання України**) *(Семеген В.О. – вивів аналітичні залежності для розрахунку відносної площі регулярних мікрорельєфів. Дзюра В.О., Марущак П.О. – постановка та формування завдань дослідження; Головка В.В. – оформлення графіків; Федів В.О. – верстка та оформлення статті).*

5. Дзюра В. О., Семеген В. О. Розрахунок відносної площі регулярних мікрорельєфів. Вісник Хмельницького національного університету. 2024. № 4(339). С. 222–229. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-339-4-35. (**Фахове видання України**) *(Здобувач вивів аналітичні залежності для розрахунку відносної площі регулярних мікрорельєфів).*

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Дзюра В. О., Семеген В. О. Сучасні проблеми та напрями покращення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин. Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 90-річчю від дня народження проф. Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю каф. техн. механіки та с.-г. машин, Тернопіль, 29–30 верес. 2022 р. / М-во освіти і науки України, Терн. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 193. *(Здобувачем встановлено вплив параметрів мікрорельєфу на експлуатаційні властивості поверхонь пар тертя).*

7. Дзюра В. О., Семеген В. О. Аналіз причин утворення дефектів на поверхнях деталей автомобільних варіаторів. Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали доповідей, 19–20 жовт. 2022 р. Рівне: НУВГП, 2022. С. 241–242. Електронне видання. *(Здобувачем проведено аналіз механізму утворення експлуатаційного дефекту).*

8. Дзюра В. О., Семеген В. О., Федів В. Я., Крук О. Ю., Марущак П. О. Аналіз причин утворення поверхневих дефектів на робочих поверхнях конусних дисків варіаторних трансмісій. Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту. Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: матеріали конф., Центральноукраїнський національний технічний університет, 22–24 листоп. 2023 р. С. 156–157. *(Здобувачем запропоновано технологію, що запобігає утворенню описаного експлуатаційного дефекту).*

9. Дзюра В. О., Бица Р. О., Семеген В. О. Аналіз сучасних тенденцій вдосконалення топографії поверхонь деталей машин для забезпечення їх експлуатаційних властивостей. Технічний прогрес в АПВ: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 2024. С. 324–328. *(Здобувачем проведено аналіз публікацій та визначено, що швидкість деформування є визначальним параметром при формуванні канавок).*

10. Бица Р., Семеген В., Крук О. Властивості регулярних мікрорельєфів як засобу забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин. Прикладна механіка: матеріали I Міжнар. наук.-техн. конф., присвяч. 80-річчю з дня народження проф. Чеслава Вікторовича Пульки, 6–7 черв. 2024 р. С. 12–14. *(Здобувачем визначено один з напрямів подальшого вдосконалення регулярних мікрорельєфів).*

11. Семеген В. О. Характеристики відносної площі деяких квазірегулярних мікрорельєфів, сформованих вібраційним обкочуванням. Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту, 20–22 жовт. 2025 року: зб. наук. пр. [Електронний ресурс] / М-во освіти і науки України, Вінниц. нац. техн. ун-т [та ін.]. Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 435–437.

Публікації, які додатково відображають результати дисертації

12. Дзюра В. О., Марущак П. О., Семеген В. О., Палюх А. Я., Марущак О. В., Ціцюра О. І. Спосіб формування регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях вібраційним обкочуванням: пат. 153223 Україна. № u202203830; заявл. 13.10.2022; опубл. 08.06.2023, Бюл. № 23/2023. *(Здобувач запропонував принципову схему способу формування регулярного мікрорельєфу).*