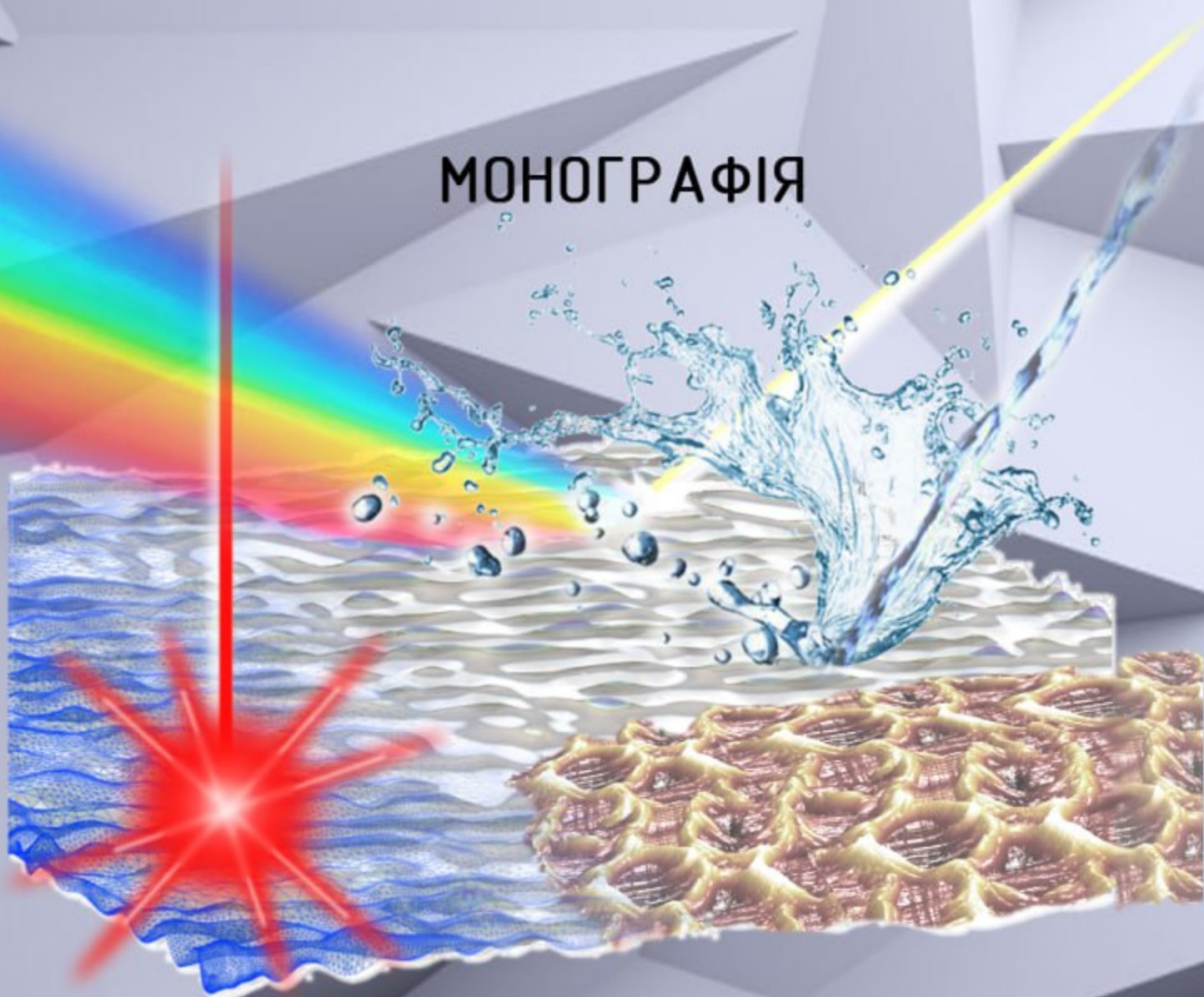




С.С. Добротворський Г.Л. Хавін
Є.В. Басова Б.О. Алексенко В.О. Приходько

Шорскість поверхні при лазерній обробці нержавіючої сталі

МОНОГРАФІЯ



Харків 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**С.С. ДОБРОТВОРСЬКИЙ, Г.Л. ХАВІН, Є.В. БАСОВА,
Б.О. АЛЕКСЕНКО, В.О. ПРИХОДЬКО**

**ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ
ОБРОБЦІ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ**

Монографія

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ»

Харків
НТУ «ХПІ»

2024

УДК 535:621.373.826]:539

Ш 33

DOI 10.20998/978-617-05-0513-2

Рецензенти:

С.І. Планковський, доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Ю.О. Сисоєв, доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем факультету авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Публікується за рішенням Вченої ради НТУ «ХПІ», протокол № 8 від 01.11.2024 р.

Ш 33 Шорсткість поверхні при лазерній обробці нержавіючої сталі: монографія / С.С. Добротворський, Г.Л. Хавін, Є.В. Басова, Б.О. Алексенко, В.О. Приходько. – Харів: НТУ «ХПІ», 2024. – 167 с.

ISBN 978-617-05-0513-2

В монографії викладено сучасні уявлення про шорсткість, як параметр якості обробленої поверхні. Розглянуто питання визначення та управління шорсткістю поверхні нержавіючої сталі AISI 321 після лазерної обробки. Надані експериментальні результати, що підтвердили можливість створення за рахунок лазерного випромінювання, як періодичних 3D структур, так і 3D структур з імовірним розподілом параметрів. Створені 3D структури мають зазвичай багаторівневий характер, що залежить від технологічних параметрів обробки лазером.

Монографія призначена для спеціалістів в галузі механічної обробки матеріалів, інженерів, аспірантів, магістрів та студентів машинобудівних спеціальностей.

Іл.87. Табл.15. Бібліогр.102 найм.

УДК 535:621.373.826]:539

ISBN 978-617-05-0513-2

© Добротворський С. С.,
Хавін Г. Л., Басова Є. В.,
Алексенко Б. О.,
Приходько В. О., 2024
© НТУ «ХПІ», 2024

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ШОРСТКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ТА ЇЇ СУЧАСНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ.....	9
1.1 Шорсткість – параметр якості в машинобудуванні, її визначення та вплив на властивості обробленої деталі.....	9
1.1.1 Якої шорсткості можна досягти різними методами обробки і що впливає на шорсткість?.....	10
1.1.2 Як співвідносяться шорсткість, чистота та цілісність поверхні?...	11
1.2 Класичне визначення шорсткості.....	12
1.2.1 Основні параметри шорсткості, їх умовні позначення та нормування.....	13
1.2.2 Формули шорсткості поверхні для традиційної лезової обробки..	17
1.3 Параметри шорсткості відповідно до стандарту ISO 25178.....	18
1.4 Площинність та її вплив на шорсткість поверхні.....	27
1.5 Найбільш ефективні способи зменшення шорсткості при механічній обробці.....	29
РОЗДІЛ 2 СУЧАСНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ ШОРСТКОСТІ. СТАНДАРТИ ШОРСТКОСТІ.....	31
2.1 Уявлення про різноманітність характеристик шорсткості в сучасному машинобудуванні, 2D та 3D шорсткості поверхні.....	31
2.2 Статистичні показники шорсткості.....	32
2.2.1 Параметричні методи.....	32
2.2.2 Текстурні (просторові) параметри.....	35
2.2.3 Гібридні параметри.....	38
2.3 Функціональні методи (Functional Methods).....	38
2.3.1 Автоковаріація, автокореляція та структурні функції.....	38
2.3.2 Спектральна щільність потужності.....	39
2.4 Фрактальна характеристика (Fractal Characterization).....	41
2.4.1 Метод вимірювання шорсткості за довжиною (Roughness-Length Method).....	42
2.4.2 Спектральна густина потужності (Power Spectral Density).....	44
2.4.3 Середньоквадратична кореляційна функція (Root-Mean-Square Correlation Function).....	45
2.5 Спрямована характеристика (Directional Characterization).....	46
2.6 Фрактальна розмірність інженерної поверхні.....	48

2.6.1 Методи оцінки фрактальної розмірності профілю поверхні.....	49
2.6.2 Визначення фрактальної розмірності інженерної поверхні.....	50
2.7 Висновки за розділом.....	52
РОЗДІЛ 3 ПРОГНОЗУВАННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ЛЕЗОВІЙ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ.....	53
3.1 Практична сторона моделювання шорсткості поверхні після обробки..	53
3.2 Методи оцінки та прогнозування величини шорсткості.....	54
3.2.1 Теоретичні методи, засновані на положеннях теорії механічної обробки.....	55
3.2.2 Методи, що досліджують вплив різних факторів на величину шорсткості на основі експериментальних досліджень і аналізу результатів.....	58
3.3 Основні методології для проведення планованого експерименту з визначення шорсткості після обробки.....	64
3.3.1 Метод поверхні відгуку (RSM).....	64
3.3.2 Методологія (концепція) Тагучі (DoE).....	66
3.3.3 Огляд планування експериментів і досліджень, з використанням RSM і підходу Тагучі для оцінки шорсткості поверхні.....	70
3.4 Методи, що використовуються в сукупності з концепцією Тагучі.....	79
3.4.1 Техніка переваги порядку за схожістю з ідеальним рішенням (TOPSIS).....	79
3.4.2 Метод головних компонент (PCA).....	81
3.4.3 Теорія корисності (Utility Theory - UT).....	84
3.4.4 Функція бажаності (Desirability Function).....	85
3.4.5 Системи нечіткої логіки (FIS) та адаптивна система нейро- нечіткої логіки (ANFIS).....	88
3.5 Підхід штучного інтелекту та м'які обчислення.....	92
3.5.1 Огляд штучних нейронних мереж.....	92
3.5.2 Нечітка логіка та нейро-нечіткі системи.....	94
3.5.3 Огляд генетичних алгоритмів.....	96
3.5.4 Дослідження штучного інтелекту.....	98
3.6 Експертні системи.....	101
3.7 Висновки за розділом.....	102
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ЗРАЗКІВ ЗІ СТАЛІ AISI 321 ПІСЛЯ ОБРОБКИ НАНОСЕКУНДНИМ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ...	104

4.1	Постановка та реалізація експериментальних досліджень впливу лазерного випромінювання на шорсткості обробленої поверхні зразків із сталі AISI 321.....	104
4.1.1	Предмет, цілі та завдання проведення експериментів.....	104
4.1.2	Реалізація експериментів. План та основні фактори експериментальних досліджень.....	105
4.2	Лабораторне обладнання та технологія проведення експериментів.....	107
4.3	Основні результати розподілу шорсткості обробленої поверхні та значень її величини, отримані експериментально.....	114
4.4	Аналіз шорсткості та хвилястості, періодичних 3D мікроструктур.....	121
4.5	Аналіз шорсткості поверхні методом атомної силової мікроскопії після наносекундного лазерного опромінення.....	128
4.6	Дослідження твердості поверхні зразків із сталі AISI 321 після наносекундної лазерної обробки.....	141
4.7	Метод аналізу та контролю мікрорельєфу поверхні шляхом відображення ковзного лазерного променя.....	146
4.7.1	Загальна постановка експериментів з контролю мікрорельєфу та розсіювання випромінювання гелій-неонового лазера на поверхні зразків.....	146
4.7.2	Дослідження та аналіз розсіювання випромінювання гелій-неонового лазера на поверхні зразків 1-4 з періодичними та ймовірними 3D структурами шорсткості.....	148
4.8	Висновки за розділом.....	155
	СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	158

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

МОР - мастильно-охолоджувальна рідина
САПР -система автоматизованого проєктування
ACF (Autocorrelation Function) – автокореляційна функція
AI (Artificial Intelligence) – штучний інтелект (ШІ)
AM (Additive Manufacturing) – адитивне виробництво
ANN (Artificial Neural Networks) – штучні нейронні мережі
ASPN (Algorithm for Synthesis of Polynomial Networks) – алгоритм синтезу поліноміальних мереж
DF (Desirability Function) – функції бажаності
FFF (Fused Filament Fabrication) – метод пошарового наплавлення
FIS (Fuzzy Inference System) – нечітка логіка
FR (Frequency of Resonance) – частота резонансу
GA (Genetic Algorithm) – генетичний алгоритм (ГА)
GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) – матриця спільної зустрічності рівня сірого
INS (Intelligent Neural Systems) – інтелектуальні нейронні системи (ІНС)
MAPE (Mean Absolute Percentage Error) – середня абсолютна процентна помилка
MLP (Multilayer Perceptron) – багатошаровий персептрон
MSE (Mean Squared Error) – середньоквадратична помилка
OLS (Ordinary Least Squares) – метод найменших квадратів (МНК)
OA (Orthogonal Array) – ортогональний масив
PCA (Principal Component Analysis) – метод головних компонент
PSD (Power Spectral Density) – спектральна густина потужності
RF (Random Forest) – метод «випадкового лісу»
RLM (Roughness Length Method) – метод довжини шорсткості
RMS (Root Mean Square) – середньоквадратичне значення
RMSE (Root Mean Squared Error) – середньоквадратична похибка
RSM (Response Surface Methodology) – метод поверхні відгуку
RTS (Relative Tool Radius) – відносно радіусу різця
SVM (Support Vector Machine) – метод опорних векторів
TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) – метод переваги порядку за подібністю з ідеальним рішенням

ВСТУП

Одним з найбільш важливих та унікальних застосувань лазера є його використання при поверхневій обробці. Точність подачі потоку енергії, що діє лише в поверхневому шарі, дозволяє формувати в поверхневому шарі властивості, не доступні для методів традиційної механічної обробки. При цьому ступінь зміни властивостей поверхневому шарі, як правило, регулюється потужністю потоку.

Фізично при поверхневій лазерній обробці має місце контрольований термічний процес на задану глибину, що забезпечує мінімальне спотворення та керований тепловий профіль у зоні теплового впливу.

З іншого боку, різноманітність оброблюваних матеріалів вимагає фактично індивідуального підходу до лазерної поверхневої обробки в кожному конкретному випадку. Крім того, найважливішу роль при поверхневій обробці грає її мета, будь то поліпшення поверхневих властивостей (твердості та міцності), зменшення тертя та зносу, збільшення втомної довговічності та загартування. Можливість створення 3D властивостей у поверхневому шарі дозволила керувати такими ефектами як відбиття та поглинання світла. Головною перевагою безконтактної лазерної обробки є можливість контролювати шорсткість поверхні та керувати нею.

У монографії зроблена спроба на основі сучасних 2D та 3D описів шорсткості поверхні проаналізувати лазерну обробку нержавіючої сталі AISI 321 та сформулювати основні закономірності, що дозволяють керувати якістю поверхні, як на якісному, так і на кількісному рівні. Представлене експериментальне дослідження та його математична обробка дозволили отримати нові оригінальні результати дослідження шорсткості матеріалу AISI 321 у термінах нових показників шорсткості, згідно з нещодавно введеним стандартом ISO 25178. Розглянуто питання зміни не лише загальної поверхневої шорсткості з ідеалізованими поверхневими та об'ємними властивостями, а й зміни відбивної здатності залежно від потужності випромінювання та кута падіння потоку.

Показано, що переміщення променя вздовж однієї з осей істотно може впливати на формування шорсткості кінцевої поверхні. З іншого боку температура в поверхневому шарі повинна підвищуватися до значень, які більше критичної температури перетворення, але менше температури розплаву. Подальше охолодження відбувається шляхом гарту з основної маси матеріалу, який практично не нагрівається в процесі лазерного впливу.

Представлені експериментальні дані для сталі AISI 321 демонструють, по суті, що має місце фазовий перехід при нагріванні, який не здатен знову трансформуватися назад при швидкому охолодженні.

Головне положення, яке сформульовано авторами, полягає в тому, що взаємодія лазера з речовиною в поверхневому шарі досягає екстремальних швидкостей нагріву та охолодження, у той час як загальна вкладена енергія недостатня, щоб суттєво вплинути на температуру об'ємного матеріалу. Цей ефект дозволяє не лише контролювати вид шорсткості після обробки, а й керувати ним кількісно.

Авторами монографії на підставі досліджень проведених на кафедрі «Технології машинобудування та металорізальних верстатів» Національного технічного університету «ХПІ» та аналізу відомих світових та вітчизняних літературних джерел, зроблено спробу узагальнити наявні дані з проблеми, прогнозування шорсткості поверхні після лазерної обробки нержавіючої сталі AISI 321 і обґрунтувати підходи до реалізації управління 2D та 3D параметрами шорсткості.

РОЗДІЛ 1

ШОРСТКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ТА ЇЇ СУЧАСНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ

1.1 Шорсткість – параметр якості в машинобудуванні, її визначення та вплив на властивості обробленої деталі

У загальному підході шорсткість є однією зі складових частин обробленої поверхні, яка в літературі часто називається текстурою поверхні. Вона складається з трьох основних компонентів: шорсткість, нашарування і хвилястість. Обробка поверхні виробів може суттєво відрізнятися залежно від матеріалів і процесів, що застосовуються у виробництві. Шорсткість поверхні, як один із компонентів текстури, зазвичай визначається, вимірюється та обчислюється. Вона характеризується відхиленнями у напрямку нормального вектора фактичної поверхні відносно її ідеальної форми. Якщо ці відхилення значні, поверхня вважається шорсткою; якщо мінімальні – гладкою.

Насамперед, шорсткість поверхні впливає на втомну міцність або довговічність деталі. Втомна довговічність знижується зі збільшенням шорсткості поверхні, особливо в умовах багатоциклової втоми. Фізично спостережувані типи шорсткості після механічної обробки (орієнтація шорсткості на поверхні) мають різний вплив на втомну міцність. Шорсткість у напрямку, перпендикулярному до дії напружень, або в окружному напрямку, має більший вплив на втомну міцність, ніж шорсткість в осьовому напрямку. Тому при проектуванні та оцінці втомної довговічності деталей шорсткість є важливим чинником і ключовим параметром у прогнозуванні втомної міцності виробу.

Шорсткість обробленої поверхні суттєво впливає на тертя та знос деталей у контакті, оскільки вони залежать від текстури поверхні. Шорсткі поверхні більш схильні до зносу через підвищені дотичні напруження тертя та нагрівання контактуючих поверхонь. Це зумовлено високим коефіцієнтом тертя, який безпосередньо залежить від шорсткості. Крім того, у шорстких поверхнях під час зношування виступів змінюються розміри, що зазвичай має локальний характер і спричиняє концентрацію напружень. Зменшення шорсткості підвищує зносостійкість деталей і знижує тертя.

Шорсткість поверхні також відіграє вирішальну роль у виникненні корозії та визначає хімічну стійкість, оскільки дефекти створюють осередки для розвитку корозії та подальшого руйнування. Вона є ключовим фактором для забезпечення герметичності контактуючих поверхонь. Для герметизуючих або зносостійких властивостей необхідні порожнини для розміщення мастильного

матеріалу. Занадто гладкі поверхні ускладнюють утримання рідинної плівки між деталями, тоді як надмірна шорсткість може спричинити підвищений знос і відмову в роботі.

Поверхні з низькою шорсткістю використовуються на підприємствах харчової та фармацевтичної промисловості, де обладнання постійно миється та очищується. Висока шорсткість може спричинити накопичення продуктів у заглибленнях, що перешкоджає якісному очищенню.

Ще одним аспектом, де шорсткість поверхні відіграє важливу роль, є зовнішній вигляд і тактильні відчуття при дотику до виробів. Це пов'язано із забезпеченням глянцевого, гладкого або матового поверхонь, які визначаються різницею в шорсткості. З іншого боку, у багатьох технологічних процесах, навпаки, потрібна висока шорсткість для забезпечення зчеплення, наприклад, під час фарбування для надання однорідності шару фарби. Фактично, з точки зору наших відчуттів, якість поверхні в побуті визначається саме її шорсткістю.

1.1.1 Якої шорсткості можна досягти різними методами обробки і що впливає на шорсткість?

Виділяють кілька основних чинників, які значно впливають на шорсткість поверхні. До них належать: методи механічної обробки, технології зняття припуску з поверхні заготовки та температура поверхні під час обробки.

Традиційні методи обробки різанням вивчалися протягом багатьох років, і досягнення в передбаченні величини та напряму шорсткості знайшли відображення у нормативних документах, стандартах та численній літературі.

У нетрадиційних методах обробки, таких як лазерна, плазмова, електроерозійна, ультразвукова обробка, 3D-друк, різання струменем води під високим тиском, електронно-променева обробка та інші, які часто використовуються як фінішні операції, питання визначення остаточної шорсткості перебуває на стадії активного дослідження. Зазвичай нові технології демонструють підвищення продуктивності обробки та покращення якості поверхні, але не завжди зменшення її шорсткості.

Технологія обробки завжди є компромісом між двома, зазвичай взаємовиключними завданнями – максимальною продуктивністю обробки та забезпеченням високої якості поверхні. Найчастіше пріоритетним є досягнення заданого рівня якості виробу, що виражається у забезпеченні визначеного рівня шорсткості поверхні. Вирішення цих завдань залежить від вибору технологічних параметрів (швидкості різання, подачі, глибини різання) для заданого матеріалу та інструменту.

Температура обробки, будучи наслідком застосування певної технології, є ключовим чинником, оскільки її підвищення у зоні деформації матеріалу вище певного порогового рівня для кожного матеріалу може призвести до значних нерівностей і підвищення шорсткості, особливо при механічних методах обробки.

Різні методи обробки багато в чому визначають кінцеву шорсткість. Незважаючи на безліч факторів, що впливають, були сформульовані укрупнені оцінки шорсткості для різних видів обробки. Діапазон шорсткості оцінюють приблизно так:

- токарна обробка: точність 0,1-1 мкм, Ra 0,25-0,5 мкм.
- алмазна обробка: точність обробки 0,001-0,01 мм.
- фрезерування: точність 0,1-1 мкм, Ra 1 μm.
- прецизійне шліфування: точність 0,01-0,1 мкм, Ra 0,05-0,25 мкм.
- електроерозійна обробка: точність 0,1-1 мкм, Ra 1-10 мкм.

1.1.2 Як співвідносяться шорсткість, чистота та цілісність поверхні?

Після механічної обробки поверхонь зазвичай використовується поняття чистоти обробленої поверхні, яке часто ототожнюють із шорсткістю. Однак ці поняття не є взаємозамінними і мають різне смислове значення. Чистота поверхні – це якісна оцінка, що базується на зовнішньому вигляді поверхні та неявно пов'язана із шорсткістю. Натомість шорсткість – це кількісна характеристика, отримана в результаті вимірювань нерівностей поверхні. Проте в багатьох випадках ці два поняття використовуються як взаємозамінні при механічній обробці.

З іншого боку, у механіці виробничих процесів часто використовують поняття цілісності поверхні після обробки. Цілісність визначає стан поверхні деталі після механічного впливу на неї під час виробництва та безпосередньо пов'язана зі зміною властивостей матеріалу. Цілісність поверхні враховується на етапі механічного проектування, але водночас під час механічної обробки важливо зберігати її. Цілісність передбачає поліпшення або, принаймні, збереження механічних характеристик матеріалу після обробки.

Таким чином, цілісність поверхні після обробки характеризується двома аспектами: топографічними характеристиками та характеристиками поверхневого шару. Топографія включає помилки форми, дефекти хвилястості та шорсткість. Характеристики поверхневого шару визначають наявність пластичної деформації, залишкових напружень, тріщин різної форми і розміру, твердості поверхневого шару, фазових і структурних переходів, міжкристалічного руйнування та водневої крихкості.

Прийнято розрізняти три основні види впливу, які впливають на цілісність поверхні після обробки. Це традиційні, нетрадиційні процеси та оздоблювальна обробка.

До традиційних відносять види обробки, в яких реалізується контактна взаємодія з різальним інструментом. При правильному виборі технологічних параметрів обробки майже всі ці процеси не порушують цілісності деталі. Для традиційної механічної обробки характерна наявність пластичної деформації з внесенням змін у поверхневий шар на глибину 100–300 мкм.

До нетрадиційних процесів відносять види обробки, в яких відсутній безпосередній контакт з інструментом (ерозійна, електрохімічна, хімічна обробка, тощо). Ці процеси забезпечують ту чи іншу цілісність поверхні залежно від параметрів їх керування (без пластичної деформації та залишкових напружень, зі зміненою структурою, тощо).

Оздоблювальна обробка покращує цілісність поверхні після традиційних і нетрадиційних методів. Фінішні операції, як правило, сприяють поліпшенню цілісності шляхом видалення поверхневих тріщин, зменшення шорсткості, зміни текстури, підвищення корозійної та зносостійкості. До оздоблювальних операцій також належить нанесення покриттів для покращення характеристик поверхні та забезпечення цілісності деталі.

1.2 Класичне визначення шорсткості

Реальна поверхня, отримана після обробки, на відміну від номінальної – геометрично правильної та гладкої, має складний рельєф, який характеризується як макро-, так і мікрогеометрією. До макрогеометрії реальної поверхні належать відхилення форми й розташування поверхонь, а також хвилястість. До мікрогеометрії відносять шорсткість поверхні деталі.

Сліди механічної обробки, спричинені подачею та глибиною різання, представляють собою нерівності або шорсткість поверхні. Їх величина може бути виміряна безпосередньо на обробленій деталі за допомогою різних інструментів або дистанційно. Величина шорсткості, як зазначалося раніше, часто має вирішальне значення для забезпечення функціональності деталі.

Загалом таке поняття, як якість обробленої поверхні, неможливо визначити кількісно. Проте шорсткість поверхні можна виміряти кількісно, і її значення зазвичай використовується для позначення рівня якості або обробки поверхні. Для традиційної механічної обробки різальним інструментом шорсткість поверхні може бути математично виражена через технологічні параметри різання та геометрію різальної частини інструмента.

Шорсткість поверхні, у поєднанні з фізичними властивостями поверхневого шару матеріалу деталі, визначає стан поверхні та, поряд із точністю форми, є однією з основних геометричних характеристик її якості. Наприклад, велике значення шорсткості поверхні має у рухомих з'єднаннях, коли труться поверхні деталей, розділені шаром мастила, і безпосередньо не контактують.

При недостатньо гладких тертьових поверхнях дотик між ними відбувається в окремих точках за підвищеним тиском, внаслідок чого мастило видавлюється, порушується безперервність масляної плівки, і створюються умови для напівсухого або навіть сухого тертя. При надмірно гладких поверхнях знижується інтенсивність затягування мастила рухомою поверхнею, що призводить до зниження гідродинамічного тиску, що також може спричинити аналогічний ефект. Ці обставини особливо важливі для підшипників сучасних швидкохідних і точних машин та приладів, де не можна допустити великих зазорів, а рідинне тертя повинно бути забезпечене за дуже тонких масляних плівок.

Зменшення шорсткості поверхні змінює характер з'єднання деталей. Зазор або натяг, які можна визначити за результатами вимірювання деталей з'єднання, відрізняються від ефективних зазорів або натягу, що виникають під час складання та в процесі експлуатації. Ефективний натяг зменшується, а ефективний зазор збільшується тим більше, чим більшу шорсткість мають сполучені поверхні.

Чистове оброблення деталей (притирання, полірування, тощо) значно підвищує їхню втомну міцність завдяки зменшенню мікронерівностей на поверхні, що суттєво збільшує антикорозійну стійкість деталей.

Шорсткість поверхні пов'язана також із низкою інших важливих функціональних показників виробів, таких як щільність і герметичність з'єднань, відбивна здатність поверхні, контактна жорсткість, міцність зчеплення під час притирки та склеювання, якість гальванічних покриттів. Вона впливає також на точність вимірювання деталей. У багатьох випадках її необхідно нормувати для надання гарного зовнішнього вигляду, зручності утримання поверхонь у чистоті, тощо.

1.2.1 Основні параметри шорсткості, їх умовні позначення та нормування

Відповідно до ГОСТ 2789, шорсткість поверхні визначається наступним чином. **Шорсткість поверхні** – це сукупність нерівностей, що чергуються з відносно малими кроками, виділена на базовій довжині.

Базова довжина l — це довжина ділянки поверхні, яка використовується для визначення параметрів шорсткості без урахування хвилястості, відхилень форми та інших нерівностей.

Відповідно до ГОСТ 2789, шорсткість поверхні виробів, незалежно від матеріалу та способу виготовлення, можна нормувати за одним або кількома параметрами, які визначаються відносно середньої лінії профілю m (рис. 1.1). Зображення шорсткості на базовій довжині l називається **профілограмою**.

Середня лінія профілю (у межах базової довжини l) проводиться так, щоб площі, розташовані по обидва боки від цієї лінії до контуру профілю, були рівними між собою.

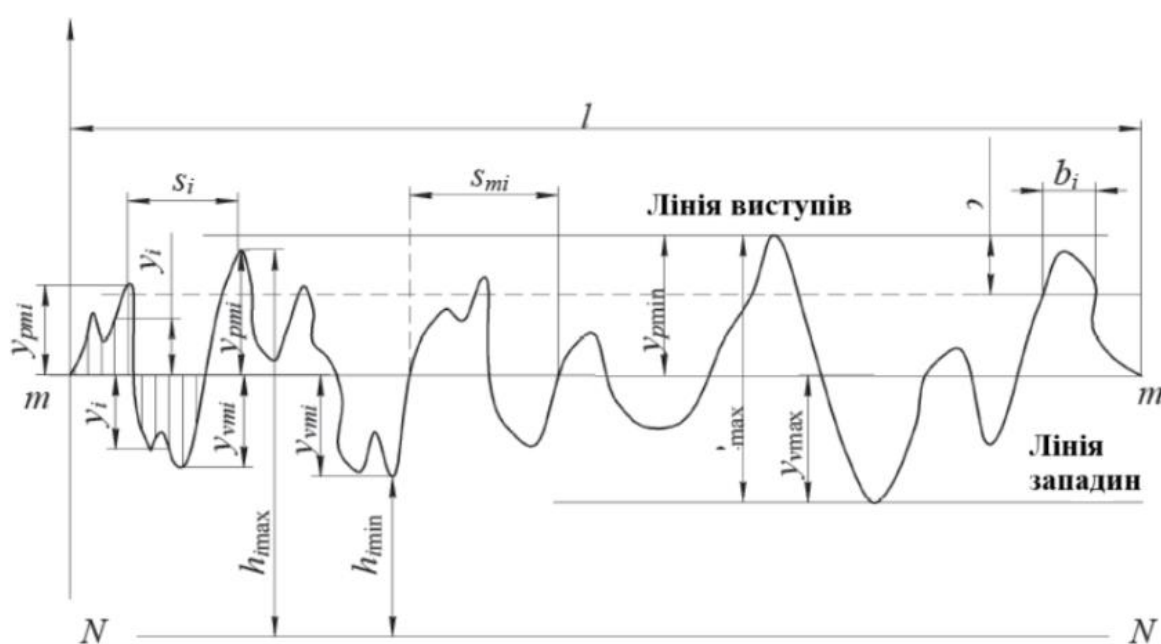


Рисунок 1.1 – Профіль шорсткості, його характеристики та параметри [1]

Для кількісної оцінки шорсткості поверхні згідно з ГОСТ 2789 найчастіше використовуються шість параметрів, рис. 1.1.

Середнє арифметичне відхилення профілю R_a – середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю від середньої лінії в межах базової довжини

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (1.1)$$

Висота нерівностей профілю по десяти точках R_z – сума середніх арифметичних абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів профілю та п'яти найбільших западин у межах базової довжини

$$R_z = \left(\sum_{i=1}^5 H_{i \max} + \sum_{i=1}^5 H_{i \min} \right) / 5. \quad (1.2)$$

Для середньої лінії, що має форму відрізка прямої, розташованої нижче профілю паралельно середньої лінії,

$$R_z = \left(\sum_{i=1}^5 h_{i \max} + \sum_{i=1}^5 h_{i \min} \right) / 5, \quad (1.3)$$

де $h_{i \max}$ та $h_{i \min}$ – відповідно відстань п'яти вищих та п'яти нижчих точок профілю до зазначеної лінії.

Найбільша висота нерівностей профілю $R_{\max}$ – відстань між лінією виступів профілю та лінією западин профілю в межах базової довжини.

Середній крок нерівностей профілю S_m – середнє значення кроку нерівностей профілю по середній лінії в межах базової довжини

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_{mi}|, \quad (1.4)$$

де S_{mi} - крок нерівностей, що дорівнює довжині відрізка середньої лінії між точками перетину її з однойменними сторонами суміжних нерівностей.

Середній крок нерівностей профілю по вершинах S – середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю по вершинах у межах базової довжини

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i|. \quad (1.5)$$

Відносна опорна довжина профілю t_p – відношення опорної довжини профілю до базової довжини

$$t_p = 1 / l \left(\sum_{i=1}^n b_i \right) \cdot 100\%, \quad (1.6)$$

де b_i - значення відрізків, що відсікаються в межах базової довжини на виступах профілю лінією, еквідистантою середньої лінії та розташованої на заданому рівні перерізу p від лінії виступів; p – відстань між лінією виступів та заданим рівнем перерізу профілю. Зазвичай рівень перерізу задають у відсотках найбільшої висоти нерівностей профілю R_{max} .

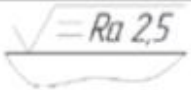
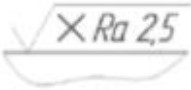
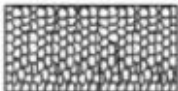
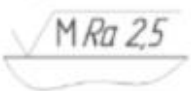
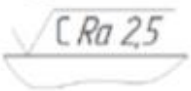
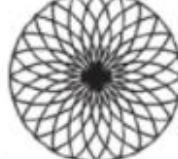
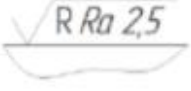
Окрім кількісних характеристик, ГОСТ 2789 передбачає нормування якісних характеристик, таких як спосіб обробки та тип напрямку нерівностей.

Спосіб обробки зазначається у випадках, коли поверхню необхідно отримати суворо визначеним методом.

Тип напрямку нерівностей (табл. 1.1) позначається, якщо це принципово важливо для правильного функціонування деталі або її сполучення. Іноді цей параметр враховують для надання гарного зовнішнього вигляду з естетичних міркувань.

Числові значення параметрів шорсткості округлюються до стандартних значень. Під час вибору числових параметрів шорсткості, крім призначення і експлуатаційних властивостей поверхонь деталей, слід враховувати можливість забезпечення заданих вимог раціональними методами обробки.

Таблиця 1.1 - Тип напрямків нерівностей. Умовні позначення [1]

№ п/п	Тип напрямів нервовостей	Схематичне зображення	Умовне позначення
1	Паралельне		
2	Перпендикулярне		
3	Перехресні		
4	Довільні		
5	Точкові		
6	Кругоподібні		
7	Радіальне		

Під час вибору конкретних значень параметрів шорсткості слід пам'ятати, що на них накладаються певні обмеження через допуски на розмір і форму нормованої поверхні. Це пов'язано з тим, що шорсткість поверхні під час складання виробу або його експлуатації може викликати додаткові відхилення розміру і форми. Наприклад, це спостерігається при приробці третюх поверхонь. Саме тому встановлюються мінімальні вимоги до шорсткості поверхні. Максимальні значення параметра шорсткості R_a залежно від допуску розміру та форми можна прийняти за такими умовами

$$R_a \leq 0,05 \cdot T_p, \quad (1.7)$$

при допуску форми 60% від допуску розміру T_p

$$R_a \leq 0,025 \cdot T_p, \quad (1.8)$$

при допуску форми 40% від допуску розміру T_p

$$R_a \leq 0,012 \cdot T_p, \quad (1.9)$$

при допуску форми 25% від допуску розміру T_p

Такий підхід доцільно застосовувати, коли немає необхідності жорсткіше обмежувати параметри шорсткості, виходячи з функціонального призначення поверхонь.

1.2.2 Формули шорсткості поверхні для традиційної лезової обробки

Природним підходом до передбачення шорсткості поверхні є створення математичних моделей або, точніше, формул, які з прийнятною точністю могли б кількісно оцінити шорсткість обробленої поверхні. Дослідження в цьому напрямку призвели до появи низки емпіричних залежностей, які в певному діапазоні змін технологічних параметрів обробки дають задовільні результати.

Наприклад, для операцій точіння традиційним різцевим інструментом було отримано формули, що описують величину шорсткості R_{max} або h_{max} для двох типів вершини інструменту: інструмент із заокругленою вершиною або умовно гострий інструмент. Зробити ідеально гострий інструмент неможливо (фактично гостроту неможливо виміряти кількісно, про неї свідчить величина заокруглення кромки). Кожен інструмент має певний радіус вершини. Коли

радіус вершини порівняний із глибиною різання, інструмент вважається з заокругленою вершиною. Якщо радіус вершини інструменту є незначним у порівнянні з глибиною різання, його можна вважати гострим інструментом.

Для гострого інструменту для R_{max} можна рекомендувати обчислення за формулою (1.10)

$$R_{max} = \frac{s_0}{\cot \varphi + \cot \varphi_1}, \quad (1.10)$$

де s_0 – подача, мм/об; φ та φ_1 головний та допоміжний кути в плані.

Для різця із заокругленою вершиною (1.11)

$$R_{max} = \frac{(s_0)^2}{8r}, \quad (1.11)$$

де r - радіус округлення вершини інструменту, мм.

При цьому середнє арифметичне значення шорсткості приблизно може бути розраховане як $R_a = R_{max} / 4$.

Фактична шорсткість обробленої поверхні може відрізнятися від розрахункових значень, оскільки існує безліч інших факторів, що впливають на якість обробки поверхні. Проте оціночні значення часто бувають цілком достатніми для більшості практичних цілей.

1.3 Параметри шорсткості відповідно до стандарту ISO 25178

У зв'язку з підвищенням вимог до точності виготовлення виробів традиційні стандарти опису параметрів поверхні лише частково відповідають сучасним вимогам до представлення параметрів шорсткості поверхні. Крім того, поняття шорсткості набуло поширення в інших сферах діяльності людини і стало невід'ємною частиною опису різних структур, не пов'язаних з обробкою поверхонь у машинобудуванні. Тому виникла необхідність переглянути існуючі стандарти, упорядкувати їх і запровадити нові параметри шорсткості, зокрема у 3D-форматі. Результатом роботи групи вчених і інженерів став стандарт ISO 25178.

Основна ідея, закладена в стандарті ISO 25178, полягає в наступному.

Процедура обробки даних, тобто виділення кількісних параметрів, виконується у три основні етапи. Ця послідовність не залежить від масштабу

застосування і може бути, загалом, використана для подальшої обробки топографії поверхні.

Етапи процедури обробки даних:

- **калібрування даних**, яке необхідне для усунення систематичних спотворень і забезпечення метрологічного контролю вимірюваних даних;

- **тривимірна фільтрація**, що являє собою набір операцій для усунення відхилень (викликаних процесом вимірювання) і забезпечення повторюваності для подальшого виділення даних;

- **виділення різних параметрів шорсткості**, включаючи:

- висотні характеристики, середньоквадратичну шорсткість, ексцес (статистичний параметр, що вимірює форму розподілу ймовірностей), асиметрію (міра асиметрії розподілу ймовірностей випадкової величини щодо її середнього значення), тощо;
- параметри, пов'язані з функцією, – частка матеріалу, об'єм, тощо;
- гібридні параметри – відношення площі поверхні, середньоквадратичний градієнт, тощо;
- просторові параметри – автокореляційні функції, напрямок текстури, тощо.

Графічне представлення трьох основних операцій після отримання даних наведено у наступній блок-схемі на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Блок-схема підходи до обробки даних [2]

Калібрування являє собою процедуру, засновану на перетворенні ряду Маклорена (зазвичай не більше третього порядку). Запропонована модель трансформації може використовуватися для опису поведінки 3D-вимірювальних приладів, зокрема з урахуванням систематичних помилок. Стохастичні компоненти не можна змодельовати за допомогою математичної функції, тому вони враховуються в залишковому члені розкладу Маклорена. Ідеальний сканер мав значення на діагоналі матриці перетворення на рівні 1, і нульові значення поза діагоналлю. Систематична нелінійність уздовж головних осей описується коефіцієнтами калібрування другого і третього порядку. Оцінка цих коефіцієнтів є досить складним самостійним завданням.

Процедура фільтрації використовується для поділу компонентів поверхні, таких як шорсткість, хвилястість і викривлення форми. Застосовуються «робастні» гаусові, «робастні» сплайнові, морфологічні та вейвлет-фільтри. «Робастні» фільтри засновані на нелінійних функціях, які здатні генерувати середні поверхні, не впливаючи на локальні особливості чи викиди, наприклад, високі піки або западини. Морфологічні фільтри реалізують операції розширення та ерозії, локально змінюючи особливості поверхні за допомогою геометричної форми, що називається структурним елементом. Потім визначають дві операції: закриття (розширення з подальшою ерозією) або відкриття (ерозія з подальшим розширенням). Вейвлет-фільтри розкладають поверхню на рівні, дозволяючи виділити компоненти, які відповідають певному масштабу. Відфільтровані топографії поверхні можуть бути використані для розрахунку і визначення параметрів шорсткості. Стандарт ISO 25178 класифікує 3D-параметри поверхні на шість основних груп, як це представлено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Опис шорсткості поверхні за стандартом ISO 25178 [1.3,1.4]

Група	Абревіатура	Примітка	Дозволяється використовувати для таких масштабів		
			Мікро-рівень	Мезо-рівень	Макро-рівень
Висотні параметри	<i>Sa, Sq, Ssk, Sku, Sp, Sv, Sz</i>	Амплітудні методи, розраховані в області визначення	X	X	X
Функціональні параметри, група 1	<i>Smr, Smc, Sk, Spk, Svk</i>	На основі функції відношення площі матеріалу обмеженою масштабом стратифікованої функціональної поверхні	X	X	X
Функціональні параметри, група 2	<i>Svq, Spq, Smq</i>	Засновані на кривій ймовірності площі матеріалу, з відношенням площі, вираженим як гаусова ймовірність	X		
Об'ємні функціональні параметри	<i>Vm, Vv, Vmp, Vmc, Vvc, Vvv</i>		X		
Функціональні параметри	<i>Svs, Srel, Svfc, Safc</i>	Засновані на фрактальних крос-масштабних описових методах	X		

Продовження таблиці 1.2

Гібридні параметри	S_{dq}, S_{dr}	Визначено на основі огинаючої поверхні та градієнтів	X	X	X
Просторові параметри	S_{al}, S_{tr}	Засновані на функціях автокореляції	X	X	X
Інші параметри	S_{td}	На основі напрямку текстури поверхні з обмеженим масштабом	X	X	X

Розглянемо докладніше деякі параметри, що наведені в табл. 1.2 (ISO 25178), і, насамперед, групу висотних параметрів.

Параметр S_a є аналогом R_a (середньої арифметичної висоти лінії) до поверхні. (середньої арифметичної висоти профілю) для поверхні. Він відображає абсолютну величину різниці висот кожної точки порівняно із середнім арифметичним значенням висоти поверхні. Параметр S_z (максимальна висота) визначається як сума максимального значення висоти піку (S_p) та максимального значення глибини западини (S_v) у межах області визначення. Цей параметр є розширеним трактуванням параметра R_z . Таким чином, формула виглядає так: $S_z = S_p + S_v$.

Параметр S_q називається середньоквадратичною висотою і визначається як середньоквадратичне значення ординат в області визначення. Це еквівалент стандартного відхилення висот і розраховується за формулою (1.12)

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy}, \quad (1.12)$$

де A – Область визначення.

Значення параметру S_{sk} (ступінь асиметрії) відображає ступінь відхилення форми шорсткості (нерівностей):

- $S_{sk} < 0$ – розподіл висот зміщений вище середньої площини (рис. 1.3);
- $S_{sk} = 0$ – розподіл висот (піки та западини) симетричний відносно середньої площини;
- $S_{sk} > 0$ – розподіл висот зміщений нижче середньої площини.

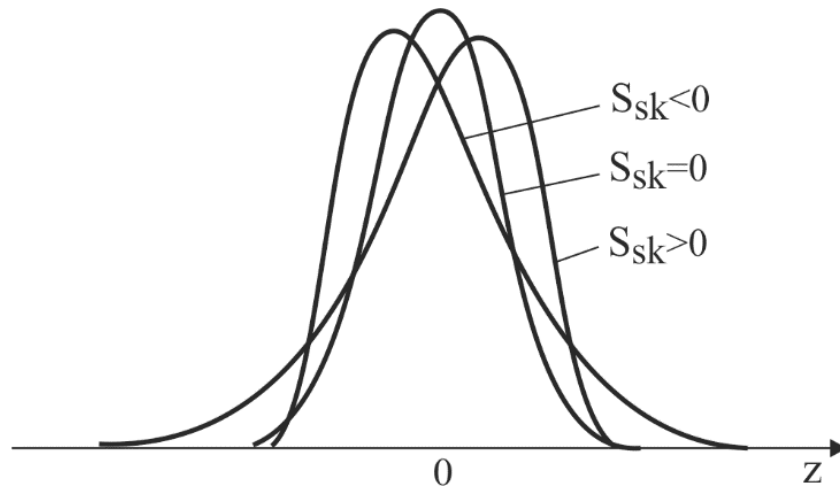


Рисунок 1.3 – Фізичний зміст параметра S_{sk} для опису ступеня відхилення форми шорсткості (нерівностей) [3]

Значення параметра S_{ku} пропонується враховувати як міру різкості профілю шорсткості (ексцес поверхні). У цьому випадку:

- $S_{ku} < 3$ – розподіл висот розташований вище середньої площини;
- $S_{ku} = 3$ – розподіл висот є нормальним, тобто гострі піки та частини з заглибленнями співіснують;
- $S_{ku} > 3$ – розподіл висот є різким.

Графічне представлення розподілу S_{ku} наведене на рис. 1.4. Розрахунок може бути виконаний за формулою (1.13):

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^4(x, y) dx dy \right]. \quad (1.13)$$

Параметр $S_p = \max_A z(x, y)$ – це максимальна висота піку, тобто значення найвищого піку в зоні визначення A . Аналогічно, $S_v = \left| \min_A z(x, y) \right|$ – це максимальна глибина западини, тобто абсолютне значення глибини найбільшої западини в межах зони визначення A .

Відповідно до табл. 1.1, до просторових параметрів відносять два – S_{al} , S_{tr} . Параметр S_{al} називається довжиною автокореляції і являє собою горизонтальну відстань у напрямку, в якому функція автокореляції найшвидше спадає до певного значення [с] (за замовчуванням 0,2) найшвидше. Цей параметр є мірою однорідності текстури поверхні.

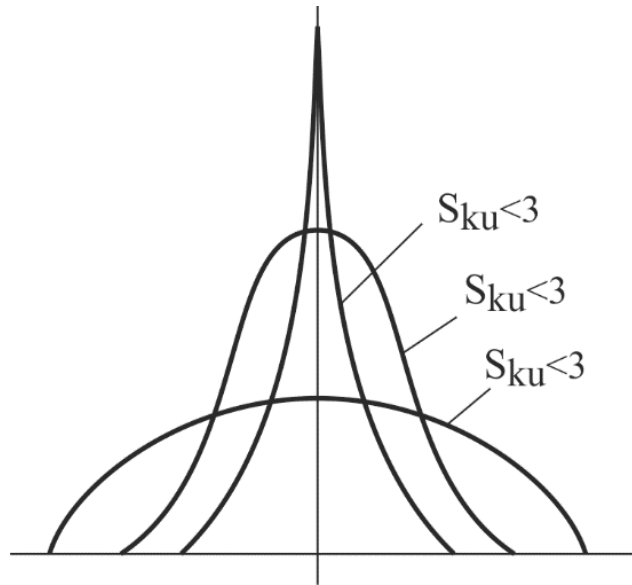


Рисунок 1.4 – Фізичний зміст параметра S_{ku} для опису міри різкості профілю шорсткості [3]

При обробці зображень функція автокореляції виступає як міра коефіцієнта відповідності між зображенням, візуалізованим у різних координатах, і початковим зображенням. Функція автокореляції, що використовується для розрахунку S_{al} та S_{tr} , має такий вигляд (1.14):

$$f_{ACF}(t_x, t_y) = \frac{\iint_A Z(x, y) \cdot z(x - t_x, y - t_y) dx dy}{\iint_A Z(x, y) \cdot z(x, y) dx dy}. \quad (1.14)$$

Параметр S_{dq} є середньоквадратичним градієнтом. Цей параметр розраховується як середньоквадратичне значення ухилів у всіх точках області визначення, і може бути представлений у вигляді

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}. \quad (1.15)$$

Зауважимо, що параметр S_{dq} абсолютно рівної поверхні дорівнює 0. На рис. 1.5 представлена поверхня із значенням параметра $S_{dq} = 1$.

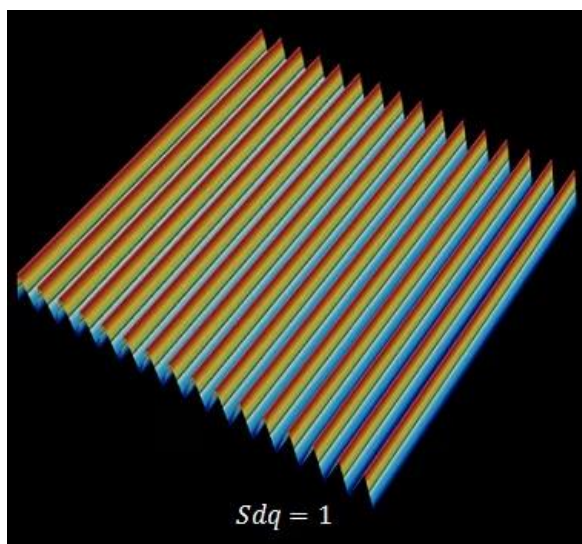


Рисунок 1.5 – Приклад поверхні з $S_{dq} = 1$ [3]

Параметр S_{dr} – коефіцієнт розвиненої міжфазної поверхні. Цей параметр виражається як відсоток додаткової площі поверхні області визначення, яку вносить текстура порівняно з плоскою областю визначення. Для повністю рівної поверхні значення S_{dr} дорівнює нулю. Значення параметра розраховується за формулою (1.16):

$$S_q = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right]. \quad (1.16)$$

Значення S_{dr} збільшується зі зростанням розвитку поверхні. Наприклад, для плоскої поверхні з компонентами градієнта 45° , значення S_{dr} дорівнює 0,414, що означає, що площа поверхні збільшилася на трохи більше ніж 40%. Цей параметр допомагає описати, наскільки поверхня є "розвиненою" або має складнішу текстуру порівняно з ідеальною гладкою поверхнею. Чим більше ця текстура, тим вище значення S_{dr} .

Один з функціональних параметрів першої групи S_k представляє собою глибину шорсткості ядра. Цей параметр розраховується як різниця висот при значеннях коефіцієнта площі матеріалу 0% і 100% на еквівалентній лінії. Зокрема, це значення отримується шляхом вирахування мінімальної висоти від максимальної висоти поверхні ядра..

Параметр S_{mr1} представляє собою коефіцієнт площі матеріалу, який відокремлює сегментовані піки від поверхні ядра, а S_{mr2} – коефіцієнт площі матеріалу, що відокремлює сегментовані западини від поверхні ядра.

До параметрів, що характеризують трибологічне зношування піків (функціональні параметри групи 2) поверхні, відносять параметр S_{pk} , який є середньою висотою піків. Сегментовані западини – це ділянки, які утримують рідину, нанесену на поверхню для поліпшення її змашувальних властивостей.

S_{vk} представляє собою середню глибину приведених западин, що зображена на рис. 1.6.

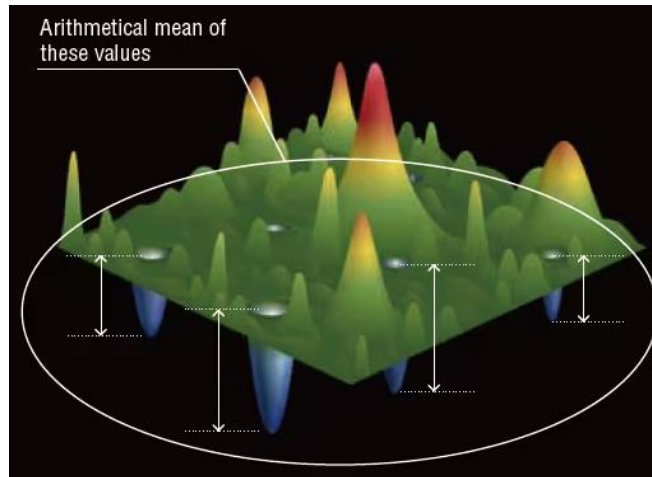


Рисунок 1.6 - Приклад визначення S_{vk} [1.3]

Параметр S_{pk} середня висота піку – це середня висота піків над поверхнею ядра, що показано на рис. 1.6, а S_{vk} – середня глибина западини. Цей параметр виражає середнє арифметичне сегментованої глибини западини кривої співвідношення матеріалів з площею, як показано на рис. 1.7.

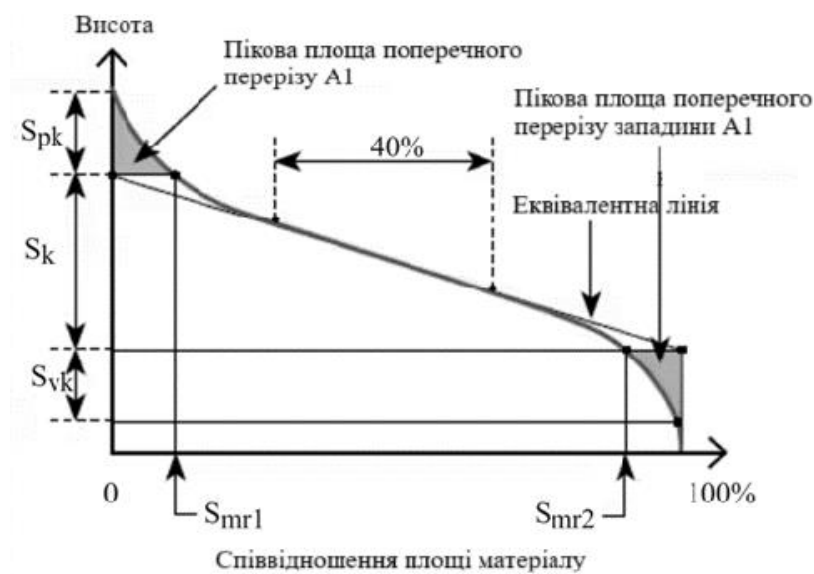


Рисунок 1.7 – Приклад визначення параметрів S_{pk} [1.3,1.4]

Це міра глибини западини під шорсткістю ядра, що вказує на глибину області, в якій накопичується рідина, нанесена на поверхню. Цей показник можна використовувати для поліпшення змащувальних властивостей поверхні.

Показник S_{mr} – частка пікового матеріалу. Це відсоток матеріалу, що містить пікові структури, пов'язані з S_{pk} , де S_{mr1} і S_{mr2} представляють відсоток поверхні на перетині максимальної висоти серцевини поверхні та кривої співвідношення матеріалів за площею.

Об'ємні параметри, такі як V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} і V_{vv} , представляють об'єми сегментованих піків, матеріалу серцевини, порожнеч серцевини та порожнеч западин відповідно, рис. 1.8. Для використання об'ємних параметрів необхідно вказати значення співвідношення матеріалів за площею, що відокремлює сегментовані піки та сегментовані западини від поверхні ядра. За замовчуванням використовується 10% та 80%.

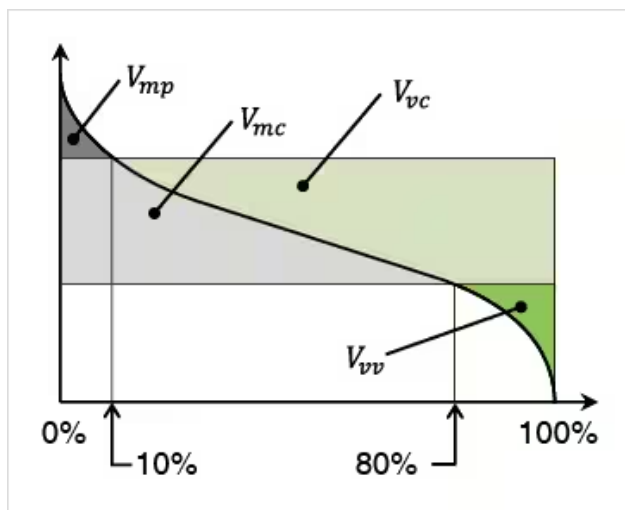


Рисунок 1.8 – Графічний приклад визначення V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} і V_{vv} [3, 4]

До других параметрів також відносяться S_{10z} – висота в десяти точках. У цьому випадку середнє значення висот п'яти піків з найбільшою глобальною висотою піка додається до середнього значення висот п'яти западин з найбільшою глобальною висотою западини.

Висота п'ятиточкового піку – S_{5p} , який представляє собою середнє значення висот п'яти піків з найбільшою глобальною висотою піка, як показано на рис. 1.9. **Висота п'ятиточкової западини** – S_{5v} , яка визначається як середнє значення висот п'яти западин з найбільшою глобальною висотою западини, як показано на рис. 1.9.

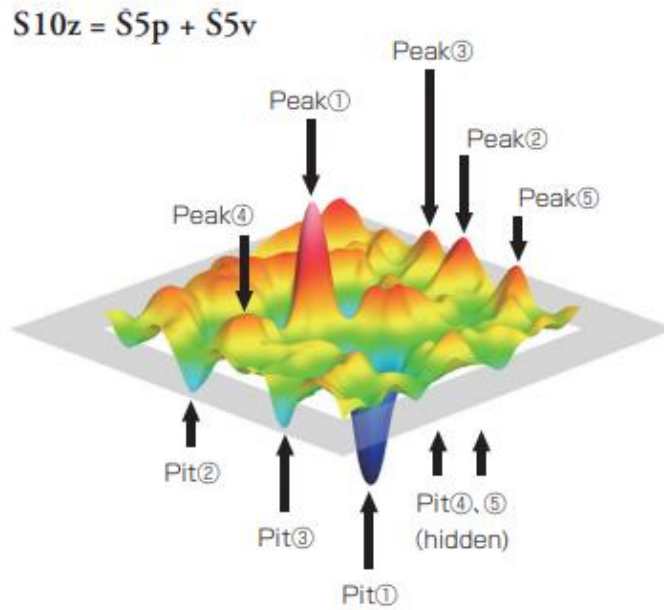


Рисунок 1.9 – Структура параметра S_{10z} [3, 4]

Таким чином, розглядаючи запропоновані параметри опису шорсткості поверхні, можна зробити наступні висновки:

- ISO 25178 представляє основні характеристики для визначення стандартних процедур і параметрів для наборів даних топографії поверхні;
- стандарт також визначає конкретні методи фільтрації, що дозволяють ізолювати ділянки поверхні, що цікавлять, мінімізуючи таким чином вклад невизначеності, пов'язаний із шумом, спотвореннями або особливостями, які не мають значення для конкретних застосувань;
- для практичної реалізації необхідне конкретне калібрування наборів даних для забезпечення відстежуваного обчислення параметрів шорсткості поверхні.

1.4 Площинність та її вплив на шорсткість поверхні

Один з найважливіших параметрів при оцінці шорсткості поверхні – це площинність. За визначенням площинність є властивістю площини, яка характеризує поверхню з точки зору її відхилення від ідеальної плоскої поверхні. В основному її допуск використовується для контролю плоских поверхонь і часто для визначення поверхні як первинної бази.

Площинність окремого допущеного елемента вважається виправленою, коли елемент розташований між двома паралельними площинами, а відстань між ними дорівнює або менша за значення вказаного допуску. Орієнтація площин повинна бути обрана таким чином, щоб максимальна відстань між ними була

найменшою можливою. Згідно з ISO 12781-1 [3], метод найменших квадратів опорної площини дає хороше наближення для відхилення площинності, хоча й переоцінює її.

Для отримання надійної оцінки площинності потрібна відповідна стратегія вибірки для отримання репрезентативного набору точок на заготовці. На практиці часто важко досягти повного покриття площинності елемента. У таких ситуаціях використовуються більш обмежені стратегії вибірки. Загалом рекомендується стратегія вибірки прямокутної сітки, що складається з рівномірно розподілених прямолінійних профілів в двох ортогональних напрямках для формування сітки, як стратегія вибірки для оцінки загальної характеристики площинності згідно з ISO 12781-2 [4].

Розглядаючи n точок поверхні (X_i, Y_i, Z_i) , витягнутих вздовж ліній L_{mj} , встановлених у двох обраних ортогональних напрямках, ми повинні отримати опорну площину найменших квадратів (LSPL) як площину, таку, що сума квадратів локальних відхилень площинності є мінімальною, рис. 1.10.

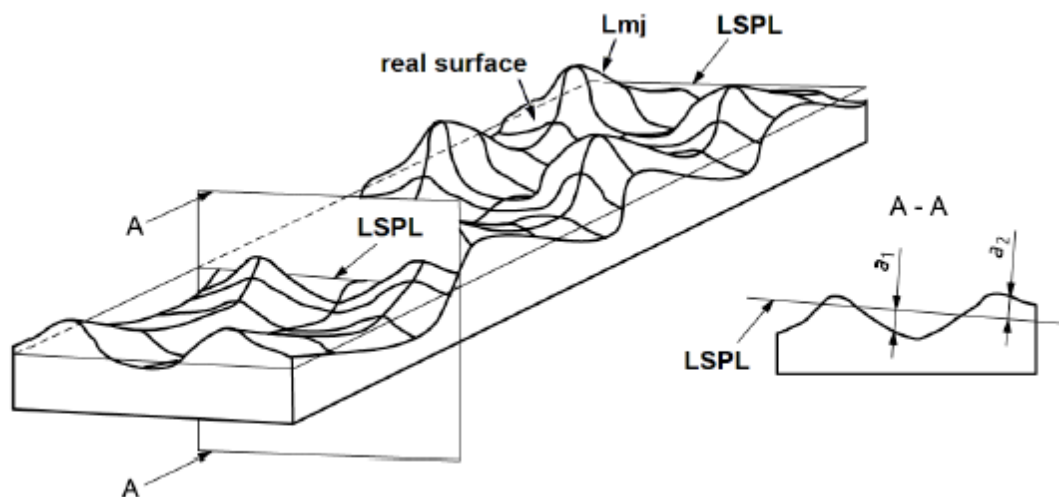


Рисунок 1.10 – Метод уявлення площини найменшими квадратами ISO 12781-1 [3, 6]

Площина найменших квадратів виду $z = a \cdot x + b \cdot y$ проходить через точку O , яка має координати $\bar{X} = \sum X_i/n$, $\bar{Y} = \sum Y_i/n$, $\bar{Z} = \sum Z_i/n$, що слугує початком нових координат $x_i = X_i - \bar{X}$, $y_i = Y_i - \bar{Y}$ і $z_i = Z_i - \bar{Z}$.

Локальне відхилення від площинності, a_i , кожної точки (x_i, y_i, z_i) від площини відліку найменших квадратів (виміряне перпендикулярно до неї) можна обчислити за допомогою співвідношення виду (1.17)

$$a_i = \frac{z_i - \hat{a} \cdot x_i - \hat{b} \cdot y_i}{\sqrt{\hat{a}^2 + \hat{b}^2 + 1}}, \quad (1.17)$$

де $\hat{a}$ та $\hat{b}$ є оціночними коефіцієнтами рівняння площини відліку найменших квадратів.

Відхилення площинності аналізованого елемента – це відхилення площинності від піку до западини, параметр $FLIt$, що визначається значенням найбільшого позитивного локального відхилення площинності, a_1 , доданим до абсолютного значення найбільшого негативного локального відхилення площинності, $|a_2|$.

1.5 Найбільш ефективні способи зменшення шорсткості при механічній обробці

Основним джерелом отримання заданої шорсткості поверхні є шліфування. На величину шорсткості впливає безліч факторів, серед яких основними є: вибір виду шліфувального круга та підготовка поверхні деталі до обробки; вибір раціональних (оптимальних) параметрів обробки; застосування охолоджуючої рідини; необхідність правки круга в процесі обробки; моніторинг процесу шліфування.

Шліфувальний круг є основним інструментом, що взаємодіє з поверхнею заготовки. Тому його характеристики, такі як тип абразиву, розмір, форма та зв'язка, мають значний вплив на шорсткість поверхні. Для зниження шорсткості слід вибрати шліфувальний круг, що володіє високою різальною здатністю, низькою швидкістю зношування та ефектом самозаточування.

Заготовка піддається шліфувальному впливу, і її властивості, такі як тип матеріалу, геометрія, твердість та стан поверхні, також впливають на шорсткість і хвилястість поверхні. Щоб зменшити ці показники, слід правильно підготувати заготовку перед шліфуванням. Перш за все, потрібно видалити з поверхні заготовки всі задирки, окалини та дефекти, які можуть спричинити подряпини, тріщини або вібрації під час шліфування. Також слід попередньо обробити заготовку якомога ближче до кінцевої форми, оскільки це зменшує глибину та час шліфування, а отже, й температурні деформації. Рекомендується обробляти заготовки з матеріалу із низьким коефіцієнтом теплового розширення, високою теплопровідністю та високою в'язкістю руйнування, оскільки такі матеріали можуть запобігти термічним пошкодженням і мікротріщинам на поверхні.

Параметри шліфування – це змінні, які управляють процесом обробки. До них належать швидкість круга та заготовки, подача, глибина різання та час взаємодії. Вони визначають швидкість знімання матеріалу, сили різання, споживану потужність і підвищення температури під час шліфування. Для

зменшення шорсткості та хвилястості поверхні слід оптимізувати параметри шліфування відповідно до вибраного шліфувального круга та характеристик заготовки. Наприклад, для отримання високоякісної поверхні слід використовувати високу швидкість круга, низьку швидкість заготовки, низьку швидкість подачі, малу глибину різання і тривалий час іскроутворення. Однак також потрібно враховувати компроміс між якістю поверхні та продуктивністю, а також обмеженнями верстата і охолоджуючої рідини.

Охолоджуюча рідина застосовується для зменшення тертя, нагріву, зносу та шуму під час шліфування. Також вона має ефект змивання стружки з круга і поверхні заготовки. Для зменшення шорсткості дуже важливо ефективно застосовувати охолоджуючу рідину під час шліфування. Дуже ефективно використовувати струмінь охолоджуючої рідини з високим тиском і швидкістю, який може проникнути в зону шліфування і досягти зони контакту. Рекомендується використовувати охолоджуючу рідину з низькою в'язкістю, високою теплоємністю та високими змащувальними властивостями, оскільки ці властивості покращують теплопередачу та змащування.

Моніторинг процесу шліфування необхідний для виявлення та діагностування будь-яких відхилень, помилок або дефектів, що можуть виникнути під час роботи. Крім того, моніторинг дозволяє регулювати і оптимізувати параметри шліфування та застосування охолоджуючої рідини безпосередньо під час обробки в режимі реального часу. Для зменшення шорсткості та хвилястості поверхні контроль процесу шліфування здійснюється за допомогою різних датчиків і приладів, таких як акустична емісія, сила та потужність різання, рівень температури, поява вібрації, тощо.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ ШОРСТКОСТІ. СТАНДАРТИ ШОРСТКОСТІ

2.1 Уявлення про різноманітність характеристик шорсткості в сучасному машинобудуванні, 2D та 3D шорсткості поверхні

Однією з найважливіших задач сучасного машинобудування є кількісна оцінка шорсткості поверхні та вивчення впливу на її величину різних технологічних, механічних та гідродинамічних факторів. Було розроблено достатньо теорій, які в основному описували величину шорсткості для окремих випадків обробки в вузькому діапазоні зміни параметрів. Усі наявні методи та підходи можна умовно поділити на статистичні, фрактальні та спрямовані.

Статистичні методи поділяються на параметричні та функціональні, які в принципі дають одне значення та функцію для оцінки шорсткості. Отримані статистичні показники шорсткості використовуються для оцінки поведінки зсуву та течії в тріщинах. Методи фрактальної характеристики розглядають шорсткі поверхні та профілі як фрактальні об'єкти, щоб отримати параметри, що характеризують шорсткість на різних масштабах. Метод спрямованої характеристики пов'язаний з міцністю на зсув і слугує для оцінки впливу шорсткості руйнування на механічний вплив.

Загалом методи визначення характеристик шорсткості повинні забезпечувати ефективну оцінку текстури поверхні, що описує її вплив на механіку поведінки поверхні. Порушена геометрія поверхні трактується як шорсткість. Визначення характеристик шорсткості є надзвичайно складною та важливою задачею механічної обробки і знаходить застосування в багатьох дисциплінах, що включають контакт з поверхнею (наприклад, трибологія, точне машинобудування, нанотехнології, тощо).

Існує величезна різноманітність характеристик шорсткості, частково тому, що існує безліч «вимірювань» для опису характеристик поверхні. Різноманіття методів для характеристики шорсткості також можна пояснити різноманіттям матеріалів і процесів отримання поверхонь. Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) кодифікує багато параметрів як профілю, так і поверхні (ISO 1997, 2010). Хоча більшість параметрів є результатом прецизійної механічної обробки та механічних змін в процесах, пов'язаних зі зносом.

Зі розвитком технологій механічної обробки удосконалювалися методи вимірювання шорсткості поверхні. На зміну контактним методам прийшли безконтактні технології. Змінився також спосіб характеристики шорсткості поверхні. З'явилися терміни «2D» та «3D» шорсткість. 2D шорсткість стосується

лінійного профілю, отриманого вимірюванням на поверхні, а 3D відноситься до карт висот поверхні або місцевості. 3D вимірювання мають перевагу перед 2D профілями, оскільки профілі 2D можуть дати неправильну оцінку реальних площ контактів. Вони також не завжди коректно визначають місця, які практично не впливають на зсувну міцність, і можуть недооцінювати особливості, які впливають на контакти та взаємодії поза площиною з профільною орієнтацією.

Цей розділ за своєю структурою та описом базується на фундаментальному огляді, представленому в роботі [7].

2.2 Статистичні показники шорсткості

Будь-яка оброблена поверхня має видимі (або виміряні) структурні характеристики, такі як площинність, хвилястість, еліпсність і тощо. Випадкові зміни проявляються в геометрії. Статистичні концепції можуть застосовуватися для структуризації випадкового процесу (наприклад, лінійного профілю поверхні). Перед розрахунком параметра шорсткості за отриманими вимірюваннями поверхні обробки, наприклад, у 2D, необхідно провести попередні підготовчі дії, що включають визначення рівного інтервалу вибірки по всьому профілю та встановлення найбільш підходящої лінії профілю як горизонтальної осі. Ці процедури обумовлені в різних стандартах, як міжнародних, так і галузевих.

2.2.1 Параметричні методи

З самого початку основні дослідження були спрямовані на обґрунтування і створення одного параметра, який характеризує шорсткість. Перш за все це було необхідно для використання параметра шорсткості в рівняннях, що описують механічну поведінку. Зокрема, це стосувалося прогнозування міцності на зріз, зносостійкості, довговічності, тощо. У переважній більшості випадків для їх опису і розрахунку використовувалися методи усереднення на основі середнього арифметичного та середньоквадратичного (RMS) відхилення. У цьому випадку проводиться опис різних рівнянь, що використовуються для кількісної оцінки шорсткості в одному параметрі на основі вимірювань профілю (2D) обробленої поверхні.

У практичних додатках результатом виміру профілю шорсткості є параметри амплітуди. Висоти та западини точок відносно заданої площини зазвичай вимірюються через заданий інтервал. Точкові вимірювання функції розподілу амплітуди можуть бути отримані шляхом відображення статистичної концепції ймовірності розподілу, що припускає нормальний розподіл. Якщо

позначити висоту профілю $z(x)$, можна отримати результуючу щільність амплітуди $p(z)$ і функцію щільності кумулятивної амплітуди $P(z)$, рис. 2.1, [8].

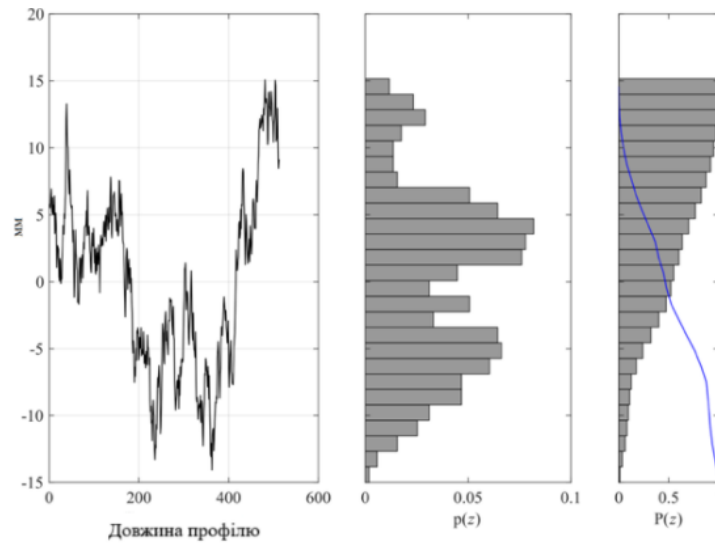


Рисунок. 2.1 – Профіль, створений з використанням методології [8] з функцією щільності амплітуди $p(z)$ та функцією щільності кумулятивної амплітуди $P(z)$

Середнє арифметичне абсолютної висоти R_a визначається за формулою (2.1)

$$R_a = \frac{1}{L} \int_L |z| dx, \quad (2.1)$$

де z – відстань профілю від середньої лінії, або лінія найменших квадратів, що перетинає профіль, x – вісь довжини, L – довжина профілю. Це доповнюється середньоквадратичним значенням висоти R_q , яке розраховується за формулою (2.2)

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_L z^2 dx}. \quad (2.2)$$

Ці два основні параметри вимірюють відносне відхилення профілю від середньої лінії. Тут R_a – просте середнє відхилення, R_q забезпечує звичну міру висоти, оскільки це, по суті, стандартне відхилення амплітуди розподілу. Ці два параметри описують відхилення від середньої лінії, і, згідно з [9], співвідношення R_q/R_a становить приблизно 1,25 для нормального розподілу

амплітуди, але може бути в межах від 1,5 до 2,5 для асиметричного розподілу за висотою.

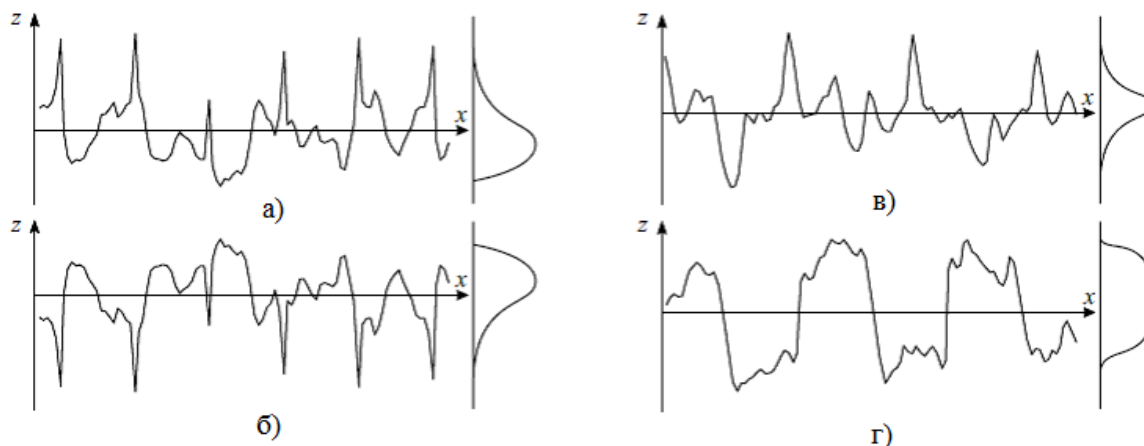


Рисунок 2.2 – Міри асиметрії та ексцесу відносно функції густини амплітуди: а – асиметрія від’ємна; б – асиметрія додатна; в і г – куртозис, відповідно до розкиду вздовж осі z і в порівнянні з нормальним розподілом амплітуд, $R_{ku} = 3$

Використовуючи поняття асиметрії та ексцесу, які є третім та четвертим центральними моментами розподілу, можна також описати форму профілю відносно середньої лінії. Асиметрія R_{sk} розраховується за формулою (2.3)

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left(\frac{1}{L} \int_L z^3 dx \right). \quad (2.3)$$

Цей параметр відображає симетрію профілю відносно середньої лінії. Параметр набуває значення при спостереженні загальної тенденції піків або западин амплітуди, що знаходить відображення в знаку параметра. Ексцес R_{ku} обчислюється за формулою (2.4) і характеризує схильність профілю відповідати середній лінії.

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left(\frac{1}{L} \int_L z^4 dx \right). \quad (2.4)$$

Цей параметр також описує різницю між широкими та хвилястими або гострими і різкими піками чи западинами. Він є мірою різкої зміни (різкості)

профілю. Цей параметр порівнюється з нормальним розподілом амплітуди, що має $R_{ku} = 3$. Розкид амплітудного розподілу ширший при $R_{ku} < 3$ і різкіше при $R_{ku} > 3$. На практиці цей параметр використовується при точній або надточній обробці.

Ці параметри є мірами відхилення від нормального розподілу і можуть не мати значення, якщо виміряні профілі показують, що розподіл по висоті близький до нормального розподілу. Вони мають значення при характеристиці поверхонь, що зазнали механічної обробки або постійних змін поверхні, оскільки ці типи поверхонь можуть відхилятися від нормального розподілу [9].

2.2.2 Текстурні (просторові) параметри

Представлені параметри амплітуди, незважаючи на свою простоту та ефективність, іноді не достатні для опису окремих важливих прикладних видів шорсткості. До їхніх недоліків відноситься те, що вони не враховують локальну хвилястість і нахил профілю, які в певних випадках можуть відігравати важливу роль у механічній поведінці поверхонь. Для усунення цього недоліку було запропоновано оцінювати шорсткість за допомогою параметрів Z_2 і Z_3 , які є середньоквадратичними значеннями (RSM) середнього локального нахилу та середньої локальної кривизни відповідно. Тоді Z_2 математично оцінюється за формулою (2.5)

$$Z_2 = R_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_L \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 dx}, \quad (2.5)$$

та Z_3 (2.6)

$$Z_3 = R'_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_L \left(\frac{d^2z}{dx^2} \right)^2 dx}. \quad (2.6)$$

Параметри Z_2 та Z_3 вимагають, щоб профілі мали постійний розподіл уздовж середньої лінії або демонстрували стаціонарність, оскільки вони чутливі до довгохвильових тенденцій усередині профілю [7]. Це може призвести до серйозних помилок при роботі з вибірками меншого розміру, оскільки нестабільність стає все більш вираженою, коли зразки поверхні стають меншими. Для подолання цього ефекту нестабільності та інструментального шуму, що впливають на результати Z_2 та Z_3 на обох кінцях спектрального

діапазону шорсткості, Z_2 та Z_3 доповнюються їхніми середньоарифметичними аналогами $R_{\Delta a}$ та $R'_{\Delta a}$, які розраховуються аналогічно до середнього ухилу за формулами (2.7)

$$R_{\Delta a} = \frac{1}{L} \int_L \left| \frac{dz}{dx} \right| dx, \quad (2.7)$$

Та (2.8)

$$R'_{\Delta a} = \frac{1}{L} \int_L \frac{d^2 z / dx^2}{\left[1 + \left(dz / dx \right)^2 \right]^{3/2}} dx \approx \frac{1}{L} \int_L \left| \frac{d^2 z}{dx^2} \right| dx \quad (2.8)$$

Якщо нахил dz/dx має невелику величину, то загальний вираз для $R'_{\Delta a}$ спрощується, як показано в рівнянні (2.8), якщо профілі грубі, то таке спрощення викликає великі похибки.

Середній нахил нерівностей A_i розраховується шляхом підсумовування різниці по вертикалі між сусідніми точками та поділу цієї різниці на довжину профілю [7, 10]

$$A_i = \tan^{-1} \left(\frac{1}{L} \sum |z_{i+1} - z_i| \right), \quad (2.9)$$

де i – індекс кожної точки.

Це величина, що представляє середню локальну різницю по всьому профілю. Цей параметр не залежить від локальних горизонтальних змін профілю шорсткості, однак на нього впливає загальна довжина профілю. Такий підхід схожий на використання параметра $R_{\Delta a}$, оскільки обидва параметри оцінюють середній нахил. Основна різниця полягає в тому, що нахил A_i розраховується опосередковано з використанням усереднених висот, тоді як $R_{\Delta a}$ розраховується безпосередньо з використанням нахилів локальних сегментів [7].

У роботах [7, 11] було запропоновано коефіцієнт шорсткості R_p , що визначається як відношення справжньої довжини профілю до номінальної довжини профілю. Ця величина розраховується за формулою (2.10):

$$R_p = \frac{1}{L} \sum \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}, \quad (2.10)$$

де сума довжин кожного сегмента ділиться на довжину L , що безпосередньо проходить між початковою та кінцевою точками. В результаті значення завжди буде більше або дорівнювати 1, де значення 1 відповідає абсолютно гладкому профілю. Для 3D-поверхні R_s використовує площу поверхні замість довжини, і ця величина розраховується за допомогою співвідношення (2.11):

$$R_s = A_t / A_n , \quad (2.11)$$

де A_t - справжня площа поверхні, а A_n - номінальна площа, яка являє собою площу поверхні після її проектування на найбільш підходящу площину. Ця проста та зрозуміла характеристика тісно пов'язана з показником направленої шорсткості.

Параметри, засновані на інтервалах, сформульовані в роботі [12]. Розглянуті підходи, засновані на середній відстані між піками (рис. 2.3, а) та середній відстані між переходами через нуль (рис. 2.3, б). Ці параметри подібні тим, що вони представляють собою середню відстань між об'єктами в 2D-профілі. Середня відстань між піками визначається як просто середня відстань між піками на профілі, тоді як середня відстань між переходами трактується як середня відстань між перетинами профілю та віссю довжини профілю (вісь x), рис. 2.3.

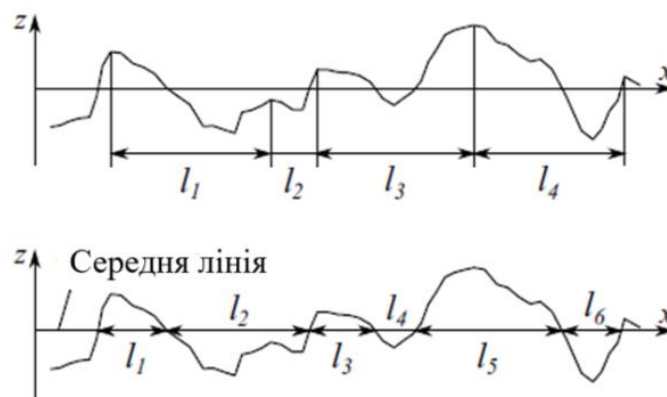


Рисунок 2.3 – Вибір відстані між піками – а; відстань між точками перетину нуля – б [7, 12]

У дослідженні [12] додатково уточнюється концепція середньої відстані між піками, реалізуючи «полосу дискримінації за амплітудою», яка підраховує піки, що проходять знизу вверх у межах цієї смуги. Це фільтрує дрібні виступи, зосереджуючи увагу на більш великих нерівностях на поверхні.

2.2.3 Гібридні параметри

Для поліпшення якості опису профілю шорсткості було здійснено кілька спроб створення нових параметрів опису, що є комбінацією вже наявних. Це комбінації амплітудних і просторових параметрів. Так, у роботах [7, 13] було запропоновано параметр, чутливий до довжин хвиль, з яких складається профіль. Середня довжина хвилі профілю R_q дорівнює

$$R_{\lambda q} = 2\pi R_q / R_{\Delta q}, \quad (2.12)$$

де R_q – середньоквадратичне значення амплітуди, а $R_{\Delta q}$ – середній нахил профілю.

Цей усереднений параметр є репрезентативним для довжин хвиль усього профілю та може дати уявлення про форму спектральної щільності потужності (PSD). Однак, він є чутливим до довжини вибірки та роздільної здатності, використаної для вимірювання, так само, як і його компоненти.

2.3 Функціональні методи (Functional Methods)

Методи опису цих параметрів мають змістовну основу, проте в прикладних задачах використання окремих параметрів може виявитися недостатнім для ефективної характеристики шорсткості [7, 13]. У дослідженнях, пов'язаних із шорсткістю, часто використовуються функціональні методи. Зміни профілю на шорстких поверхнях здаються випадковим просторово змінним процесом, який можна спостерігати за допомогою методів математичної обробки сигналів. Деякі з цих методів пов'язані зі статистичними параметрами, описаними раніше, що передбачає використання обох підходів.

2.3.1 Автоковаріація, автокореляція та структурні функції

Автокореляційна функція визначається через автоковаріаційну функцію профілю. Функція автоковаріації $ACVF(\tau)$ розраховується безпосередньо із профілю за формулою (2.13):

$$ACVF(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_L z(x) \cdot z(x + \tau) dx, \quad (2.13)$$

де τ - відстань автоковаріаційного лага.

Ця функція пов'язана безпосередньо з автокореляційною функцією $ACF(\tau) = ACVF(\tau)/R_q^2$, яка нормує автоковаріацію функції. Межа $L \rightarrow \infty$ означає, що при великих довжинах вибірки, функція більше наближатися до значень репрезентативної поверхні.

Функція автоковаріації може допомогти визначити довжину кореляції, яка є відстанню, на якій будь-які дві довільні точки статистично незалежні. Її можна визначити як точку перетину з віссю автокореляційної функції або відстань, на якій автокореляція зменшується до рівня менш ніж 10%.

Однак для профілів із нестабільним середнім значенням, які мають повторювану структуру або тенденцію до її формування, функція автокореляції не забезпечує адекватного опису. Крім того, довжина кореляції чутлива до фільтрації профілю, особливо в контексті довгих хвиль.

Для вирішення цих недоліків дослідниками було запропоновано структурну функцію як альтернативу. Вона краще описує ефекти нестабільності та дозволяє легко виявити вплив фільтрації на профіль, оскільки є нечутливою до фактичної середньої лінії профілю.

З іншого боку, в [9] стверджується, що структурна функція не надає більше інформації, ніж автокореляційна функція. Це відразу стає очевидним при розгляді зв'язків між рівняннями

$$SF(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_L [z(x) - z(x + \tau)]^2 dx = 2R_q^2 [1 - ACF(\tau)], \quad (2.14)$$

оскільки структурна функція є лише алгебраїчним перетворенням автокореляційної функції, що включає середньоквадратичну амплітуду R_q [9].

2.3.2 Спектральна щільність потужності

Спектральна густина потужності (PSD), позначається як $G(f)$, може використовуватися для опису величин хвиль різних довжин, що складають сигнал або профіль; це дозволяє розрізняти відносну важливість хвилястості та нерівностей (тобто довгохвильової та короткохвильової шорсткості відповідно). PSD можна отримати, застосувавши перетворення Фур'є до автокореляційної функції (ACF) за формулою (2.15):

$$G(f) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{\infty} ACF(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau, \quad (2.15)$$

де f представляє частоту хвилі як компонент автокореляційної функції, а i – уявна одиниця (рис. 2.4). Цей профіль було створено з використанням зворотного перетворення Фур'є, і в цьому представленні можуть бути відсутні особливості, які не описуються PSD. Пунктирна лінія показує логарифмічну лінійну регресію. Довжина хвилі знаходиться в діапазоні між частотою дискретизації та довжиною вибірки.

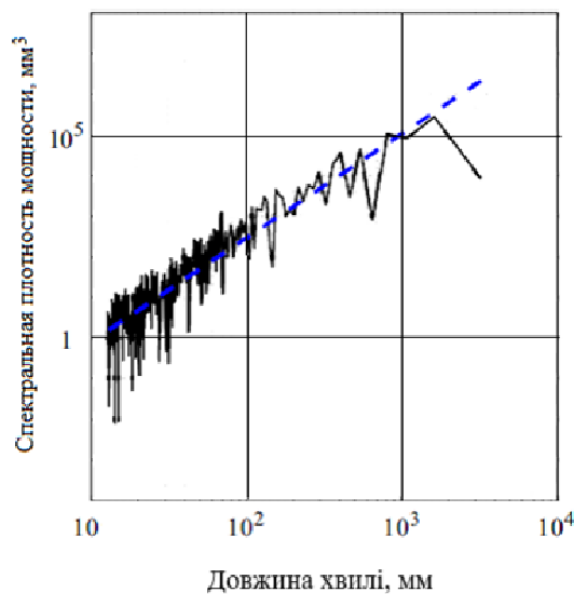


Рисунок 2.4 – Залежність PSD профілю від довжини хвилі

PSD пов'язане із середньоквадратичним параметром шорсткості R_q співвідношенням (2.16)

$$R_q^2 = \int_{\omega_0}^{\infty} G(f) df, \quad (2.16)$$

де ω_0 - верхня частота зрізу спектра потужності [7]. Завдяки своєму зв'язку з R_q PSD демонструє більш високий рівень деталізації характеристик шорсткості, крім дисперсії профілю. Як і у випадку характеристик ACF (автокореляційної функції), на PSD впливає нестационарність зразка, що ускладнює захоплення і виявлення характеристик із великою довжиною хвилі [2.1]. Більш довгі хвилі мають більший вплив на шорсткість у порівнянні з коротшими. Це підкреслює важливість масштабування параметрів шорсткості.

Корисність PSD розширюється завдяки використанню характеристик шорсткості як фракталів, які описують залежність шорстких поверхонь від масштабу.

2.4 Фрактальна характеристика (Fractal Characterization)

Фрактали та фрактальна математика описують об'єкти, що мають схожу або близьку конфігурацію при спостереженні в різних масштабах. Ці об'єкти не піддаються опису засобами традиційної геометрії. У застосуванні до шорсткості поверхні після механічної обробки вважається, що ці поверхні проявляють самоафінні фрактальні властивості. Відмінність їх від загального класу самоподібних фрактальних об'єктів, масштабованих ізотропно, полягає у тому, що вони мають різні значення масштабування вздовж вертикальної та горизонтальної осей відліку [7]. Це дещо ускладнює процес їхнього аналізу, оскільки не всі методи підходять для самоафінних фракталів.

Таке масштабування описується степеневим законом, який спостерігається як лінія в логарифмічному просторі, як по горизонтальній, так і по вертикальній осі. Для опису складності фрактала використовують поняття його розмірності D , яка пов'язана із показником Гьорста H за формулою:

$$H = E - D, \quad (2.17)$$

де E – мірність простору, у якому вимірюється фрактал, $E = 2$ – для профілів, $E = 3$ – для поверхонь.

Значення D , наприклад, для неоднорідностей гірських порід, згідно з [7, 14], зазвичай знаходяться в діапазоні 1–1,5 для профілів (можливий діапазон 1–2) і 2–2,5 для поверхонь (можливий діапазон 2–3). Це узгоджується з визначенням самоафінних фракталів, де $D = 1,5$ для профілів порівняно з самоподібним визначенням, де $D = 2$ [14]. У літературі D і H використовуються як взаємозамінні поняття [7, 14].

Поверхні, отримані в результаті механічної обробки, представляють собою мультифрактальні об'єкти, які враховують макрогеометрію, шорсткість і субшорсткість. Тому, на додаток до відомих параметрів шорсткості, слід використовувати фрактальні характеристики поверхонь, зокрема розмірність D .

Уявлення інженерної поверхні у вигляді фрактального об'єкта та використання комп'ютерних технологій дозволяють спростити розв'язання задач, що вимагають урахування шорсткості, при цьому точність оцінок параметрів взаємодії зростає.

Дослідниками було запропоновано кілька методів для визначення значення D поверхонь. Представлені підходи досить часто давали суперечливі результати, що пояснювалося неточністю вимірювань поверхні або помилками у застосуванні фрактальних концепцій. Однак у [7, 15] було висунуто припущення,

що параметр амплітуди, який є коефіцієнтом фрактальної степеневі залежності, необхідний для характеристики шорсткості як фрактала.

Для оцінки фрактальної розмірності профілю поверхні було розроблено кілька методів:

- метод відрізків (yardstick method);
- метод покриттів;
- метод нормованого розмаху, чи метод Гьорста;
- визначення фрактальної розмірності за спектром потужності;

Найбільш точним і простим у використанні є метод спектральної щільності для визначення фрактальної розмірності профілю поверхні, а також метод «периметр-площа» для визначення фрактальної розмірності 3D поверхні.

У процесі практичного застосування фрактального підходу для кількісної оцінки шорстких поверхонь не всі відомі методи продемонстрували свою ефективність. Серед них, за даними [7], до найбільш ефективних методів можна віднести: метод довжини шорсткості, метод PSD та середньоквадратичну кореляційну функцію [8]. Ці методи характеризують шорсткість на основі різних принципів.

2.4.1 Метод вимірювання шорсткості за довжиною (Roughness-Length Method)

Метод вимірювання шорсткості за довжиною (Roughness Length Method - RLM) розраховує стандартне відхилення всередині заздалегідь вибраних локальних ліній або площин («вікон»), що визначають локальні області на відповідній загальній поверхні найкращим чином. Поверхня спочатку поділяється на сукупність локальних площин – «вікон» заздалегідь заданого розміру, відповідного для математичної обробки, див. рис. 2.5.

Стандартне відхилення визначається у кожному «вікні». Будується логарифмічний графік, який показує стандартне відхилення, при цьому змінюється розмір вікна, і розраховується середнє значення відхилення за формулою (2.18):

$$S(w)=RSM(w)=\frac{1}{n_w}\sum_{i=1}^{n_w}\sqrt{\frac{1}{m_i-2}\sum_{j\in w_j}(z_j-\bar{z})^2}$$

де $S(w)$ – середнє стандартне відхилення точок для заданої довжини вікна; n_w – загальна кількість вікон; m_i – кількість точок у вікні; w_j – j -е вікно; $(z_j - \bar{z})$ –

різниця між виміряними точками на поверхні та площиною найкращої відповідності у j -му вікні.

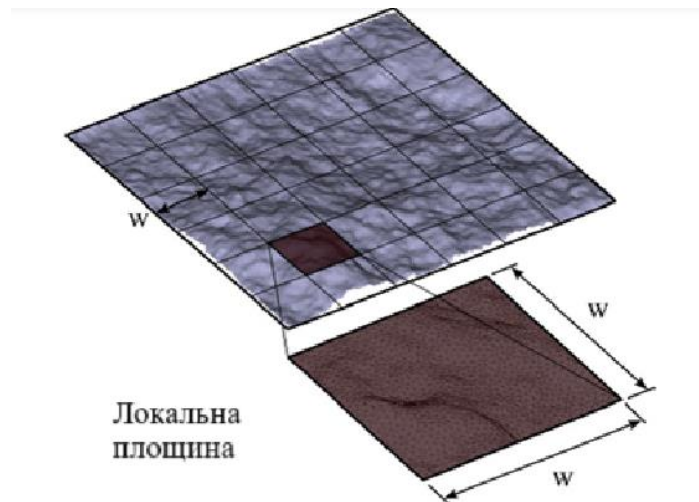


Рисунок 2.5 – Метод довжини шорсткості. Підрозділ поверхні здійснюється за допомогою квадратних вікон, які згодом підганяються до точок усередині локальної площини [7]

Поведінка фрактального масштабування визначається з використанням логарифмічної лінійної регресії виду

$$S(w) = Aw^H, \quad (2.18)$$

де w – ширина вікна, $S(w)$ – середнє стандартне відхилення для заданої довжини вікна, H – показник Гьорста, а A – константа пропорційності (рис. 2.6). Нахил лінійної логарифмічної регресії (пунктирна лінія на рис. 2.6) дорівнює показнику ступеня H , а точка перетину визначає коефіцієнт A в рівнянні (2.18).

Незважаючи на те, що H часто приймається за міру шорсткості, коефіцієнт A є мірою амплітуди шорсткості, що залежить від масштабу шорсткості досліджуваного об'єкту і є аналогом статистичної амплітуди, що вимірюється за допомогою R_q і R_a . На практиці «вікна» обирають квадратними [7], хоча існує припущення, що оцінювання можна проводити і за допомогою прямокутних «вікон» [7, 15].

У тих самих дослідженнях було показано, що існує розмір «вікна», вище якого шорсткість поверхні вже не можна описувати як фрактал, а лише як стаціонарний випадковий процес. Цей розмір «вікна» називається порогом стаціонарності, і його величина відповідає розміру «вікна», за якого середнє стандартне відхилення $S(w)$ стає постійним.

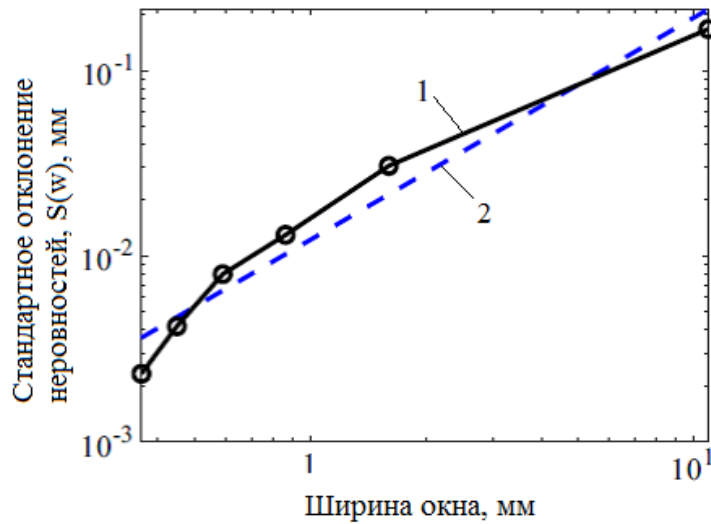


Рисунок 2.6 – Визначення фрактальної розмірності за допомогою логарифмічної лінійної регресії. 1 – Фрактальне вимірювання шорсткості-довжини; 2 – Скорегований фрактал

Вибір місць розташування «вікон» є суб'єктивним і може суттєво змінювати результати, якщо спостерігаються значні відхилення від площини регресії.

2.4.2 Спектральна густина потужності (Power Spectral Density)

Метод спектральної густини потужності (PSD) був сформульований для поверхонь гірських порід і демонструє близьку до лінійної залежність при побудові у логарифмічних координатах. У літературі [2.1] ця закономірність отримала назву «червоний шум» (“red noise”), оскільки у функції PSD домінують більш довгі «червоні» хвилі. Нахил цієї залежності описується як фрактальна залежність у вигляді (2.19):

$$G(f) = C f^{-\beta}, \quad (2.19)$$

де C – параметр амплітуди, f – залежна змінна фрактала, яка представляє хвилі, що формують автокореляційну функцію профілю. Вона є спектральним показником, що пов'язаний із показником Гьорста як $\beta = 2H + 1$. Значення зазвичай знаходиться в діапазоні $2 < \beta < 3$ [7, 14].

Однак існують інші співвідношення виду $D \cong 2/\beta + 2$, це припускає, що $H \cong \beta/2$, якщо враховувати профільний фрактал. Для грубого рельєфу поверхні C описує крутизну топографії поверхні, тоді як β описує зміну масштабу.

Також було запропоновано інший параметр, названий «довжиною перетину» (“crossover length”), який визначає властивість, що характеризується тим, що довжина вибірки дорівнює середньоквадратичному відхиленню [7, 16] і отримується, коли PSD перетворюється в співвідношення (2.20)

$$\int_f G(f) = R_q = \sigma(\lambda_0) = b \left(\frac{\lambda_0}{b} \right)^{2-D}, \quad (2.20)$$

де b - довжина перетину, λ_0 відповідає найбільшій довжині хвилі, D – фрактальна розмірність.

Величина σ відноситься до функції стандартного відхилення профілю щодо λ_0 . Довжина перетину безпосередньо пов'язана з «топотезою» (k), яка нормалізує PSD поверхонь на різних масштабах вздовж загального нахилу [2.1]. Форма, яку приймає «топотеза», визначається виразом (2.21)

$$|\sigma(\lambda_0)|^2 = k \lambda_0^{2(2-D)}, \quad (2.21)$$

де k – топотеза. Взаємозв'язок довжини перетину b та топотези k має вигляд $k = b^{2D-2}$

З цих рівнянь випливає, що середньоквадратичний параметр шорсткості R_q залежить від масштабу зразка, а топотеза та довжина переходу є мірами масштабу зразка. Це означає, що ці параметри використовуються для оцінки характеристик поверхні в різних масштабах, допомагаючи визначити, як змінюється топографія поверхні в залежності від розміру досліджуваного об'єкта. Топотеза і довжина переходу можуть бути корисними для опису поведінки поверхні при різних масштабах, зокрема для аналізу фрактальних властивостей і характеристики довгохвильових компонентів шорсткості.

2.4.3 Середньоквадратична кореляційна функція (Root-Mean-Square Correlation Function)

При обробці поверхні може виникати анізотропія шорсткості в напрямку осей координат. Часто виникає необхідність у практичній оцінці цієї анізотропії. Для цього був розроблений метод визначення фрактальних характеристик, що описує зв'язок між середньоквадратичним значенням перепаду висот профілю і інтервалом довжини, який використовується для вимірювання перепадів висот [7, 17]. Фрактальні співвідношення встановлюються рівнянням (2.22)

$$\sigma(\Delta x) = \alpha (\Delta x)^H, \quad (2.22)$$

де α – коефіцієнт узгодження, Δx – інтервал перепаду висот, H – показник Гьорста та $\sigma(\Delta x)$ – середньоквадратичне значення перепаду висот, розраховане за формулою (2.23)

$$\sigma(\Delta x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_L |z(x) - z(x + \Delta x)|^2}, \quad (2.23)$$

яке є стандартним відхиленням абсолютного перепаду висот за профілем.

Цей метод використовувався для характеристики шорсткості поверхні з урахуванням анізотропії шляхом порівняння з показником Херста, оціненим з використанням профілів, знятих вздовж і перпендикулярно до напрямку ковзання. Аналогічні результати, у яких кореляційна функція RMS здатна демонструвати анізотропну шорсткість стосовно поверхні ковзання, були представлені в [7, 8]. Показано, що напрям ковзання можна визначити за шорсткістю спрямованої середньоквадратичної кореляційної функції і що зміни H , отримані за допомогою середньоквадратичної кореляційної функції, ефективно відображають процеси, наприклад, вивітрювання поверхонь, що піддаються впливу клімату або, наприклад, пітінг.

2.5 Спрямована характеристика (Directional Characterization)

Описувати шорсткість рекомендується вздовж напрямку ковзання, який може бути відомий заздалегідь або визначений у процесі оцінки. Метод вимірювання спрямованої шорсткості безпосередньо пов'язує заданий напрямок із шорсткістю та її реакцією на зсув, не потребуючи виділення окремих профілів [7, 18]. Опір зсуву збільшується залежно від відносної площі контакту з крутим схилом. Нахили та розподіл таких контактів змінюються залежно від напрямку, що впливає на передачу зусиль через з'єднання. Це означає, що при оцінюванні шорсткості, яка впливає на міцність шорстких з'єднань на зсув, слід враховувати тільки потенційні площі контакту [7, 18]. Суть цього підходу подібна до статистичного параметра Z_2 , у якому нахил функції оцінюється безпосередньо з профілю.

Під час аналізу шорсткості у заданому напрямку α , кожен трикутник, спрямований до зсуву, формує «видиме провалення», що розраховується через співвідношення з θ і α відповідно до рівняння (2.3). Далі θ^* кожного трикутника використовується для побудови кумулятивного розподілу [7, 19].

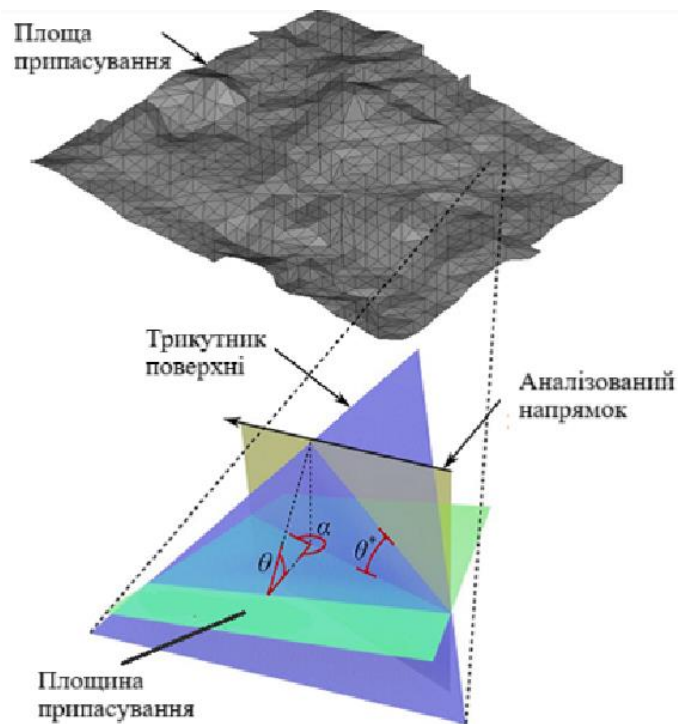


Рисунок 2.7 – Поверхні будуються з використанням трикутників, які мають абсолютний напрямок падіння, що називається «справжнім падінням».

Метод аналізу складається насамперед із реконструкції поверхні на основі вимірювань висот точок у вигляді трикутної полігональної сітки. Трикутники, орієнтовані у напрямку, протилежному напрямку аналізу, залишаються для дослідження, тоді як інші відсіюються, оскільки лише частина поверхні, спрямована у протилежному аналізу напрямку, може забезпечити опір зсуву. Видиме падіння визначається на основі вектора нормалі трикутника щодо напрямку аналізу. Вони пов'язані через співвідношення

$$\tan \theta^* = -\tan \theta \cdot \cos \alpha, \quad (2.24)$$

де θ^* – видимий кут падіння, θ – справжній кут падіння трикутника, α – кут між азимутом нормального вектора та напрямком аналізу [7, 18] (рис. 2.7). Спадний розподіл сукупної частки площі відносно θ^* виходить шляхом підсумовування частки трикутної площі з видимим нахилом, більшим за θ^* для кожного запитаного значення θ^* . Це забезпечує розподіл потужності, який задається як

$$A_{\theta^*} = A_0 \left(\frac{\theta_{\max}^* - \theta^*}{\theta_{\max}^*} \right), \quad (2.25)$$

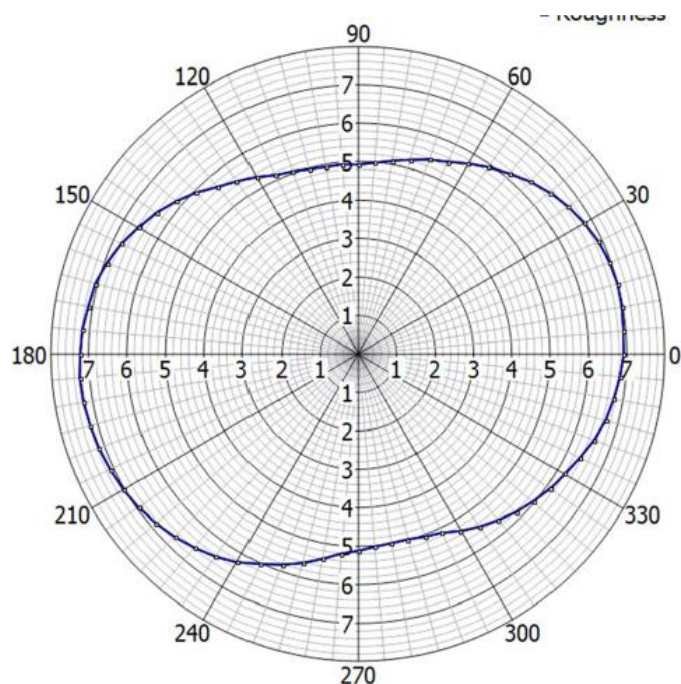


Рисунок 2.8 – Показник спрямованої шорсткості, нанесений радіально вздовж поверхні в залежності від напрямку, вздовж якого розраховується шорсткість

Лінія на сітці (рис. 2.8) відповідає шорсткості і виражає параметр $A_0 \theta_{\max}^* / (C + 1)$, де A_0 - нормалізована сукупна площа всіх полігонів у напрямку аналізу, $\theta_{\max}^*$ - максимальне вимірюване значення видимого кута нахилу, C - коефіцієнт. Параметр апроксимації C слід визначати за допомогою методу нелінійної регресії, оскільки логарифмічне перетворення цього рівняння призводить до нелінійної залежності. Визначаючи ці параметри на основі напрямку зсуву, можна чітко спостерігати анізотропію шорсткості [7, 19].

2.6 Фрактальна розмірність інженерної поверхні

Представлення інженерної поверхні у вигляді фрактального об'єкта та сучасні комп'ютерні технології дають змогу вирішувати контактні задачі з урахуванням шорсткості з високою точністю оцінок параметрів контактної взаємодії.

Інженерні поверхні можна трактувати як мультифрактальні об'єкти, що враховують макрогеометрію, шорсткість та субшорсткість. Тому поряд із традиційними параметрами шорсткості слід використовувати фрактальні характеристики поверхні, такі як розмірність D , яка є дробовою величиною.

2.6.1 Методи оцінки фрактальної розмірності профілю поверхні

До основних методів оцінки фрактальної розмірності профілю поверхні належать [7, 19]: метод відрізків, метод покриттів, метод нормованого розмаху (метод Гьорста) і метод визначення фрактальної розмірності за спектром потужності.

Метод відрізків (yardstick method).

Суть методу полягає у вимірюванні виділеного фрагмента фрактальної кривої довжиною L відрізками певної довжини r . Кількість відрізків n , необхідних для вимірювання довжини досліджуваної кривої, кінці яких розташовані на профілі (рис. 2.9, а), нелінійно зростає зі зменшенням довжини відрізка r . Залежність довжини $l = n \cdot r$ від r у подвійних логарифмічних координатах дозволяє обчислити фрактальну розмірність профілю за формулою

$$D = \lg(n) / \lg(1/r). \quad (2.26)$$

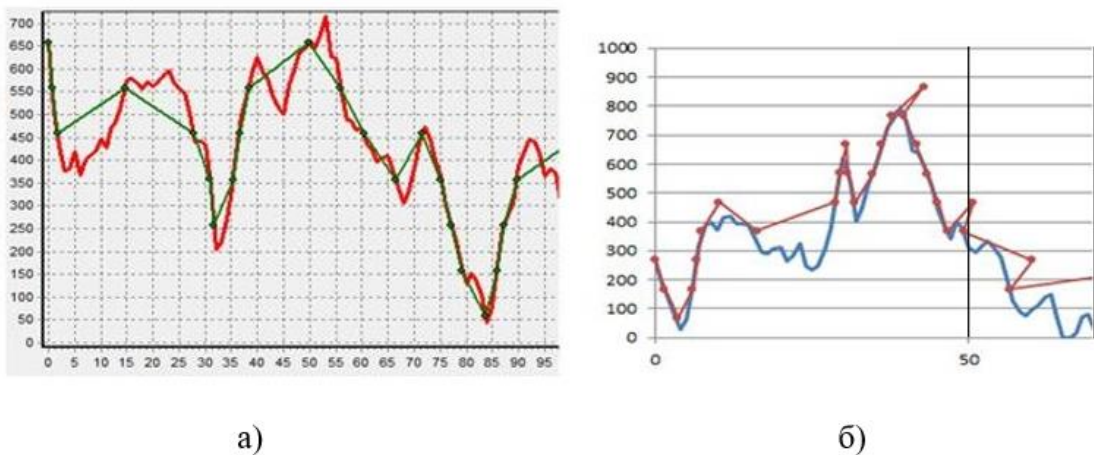


Рисунок 2.9 – Ілюстрація методу відрізків та покриттів:
а – методу відрізків; б – метод покриттів

Цей метод застосовний тільки для самоподібних кривих. Для самоафінного профілю слід враховувати різні масштаби у вертикальному та горизонтальному напрямках профілю.

Метод покриттів.

Метод дуже схожий на метод «yardstick», проте відрізняється тим, що відрізок, яким вимірюють довжину виділеного фрагмента фрактальної кривої, лежить на ній, не перетинаючи її, а лише торкаючись профілю. Приклад методу покриття наведено на рис. 2.9, б.

У методі покриттів у подвійних логарифмічних координатах будують залежність довжини профілю $l = n \cdot r$ від числа покриттів r . Фрактальна розмірність визначається за кутом середньої лінії графіка.

Метод нормованого розмаху (метод Гьорста).

Суть методу нормованого розмаху полягає у знаходженні середнього вибіркового значення висот профілю X на досліджуваній довжині L у вигляді: $X(L) = 1/L \sum X(l)$. Тоді накопичене відхилення висот профілю $X(t)$ від середнього значення буде відповідати $X(t, L) = 1/L \sum [X(U) - X(L)]$. Вираз для амплітуди розмаху має вигляд $R(L) = \max X(l, L) - \min X(l, L)$.

Нормований розмах добре описується степеневою залежністю $R / S = (\tau / 2)^H$, де H – показник Гьорста, пов'язаний з фрактальною розмірністю співвідношенням: $D = 2 - H$.

Визначення фрактальної розмірності за спектром потужності.

Представлення фрактальної розмірності за спектром потужності має вигляд (2.27):

$$P(\omega) = C_p \omega^{-S}, \quad (2.27)$$

де $P(\omega)$ – функція спектру потужності, ω – частота, C_p – деяка константа, S – нахил середньої лінії функції спектра потужності. Фрактальну розмірність визначають за нахилом середньої лінії функції спектра потужності, яка в подвійних логарифмічних координатах стає лінійною.

2.6.2 Визначення фрактальної розмірності інженерної поверхні

Існуючі процедури тривимірного топографування шорсткої поверхні дозволяють створювати тар-карти – 3D-моделі інженерних поверхонь. На їх основі було розроблено методи визначення фрактальної розмірності поверхні [7, 19], до яких належить метод визначення фрактальної розмірності через аналіз «периметр-площа острова».

Визначення фрактальної розмірності ізотропних та анізотропних поверхонь пов'язане з технологією зрізу поверхні горизонтальною площиною та аналізом форми утворених «островів». Фрактальна розмірність визначалася через аналіз співвідношення «периметр-площа» острова (рис. 2.10).

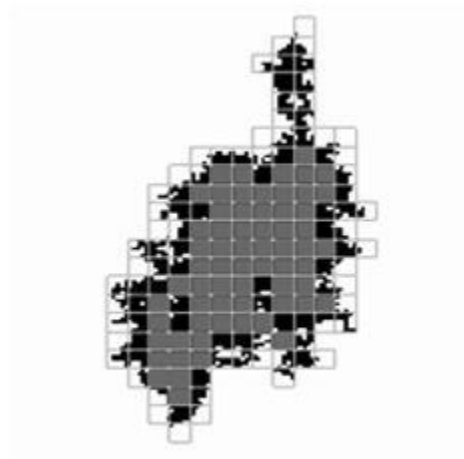


Рисунок 2.10 – Визначення периметра та площі «острова» [2.13]:

$N_p = 92$ - Число осередків, що покривають периметр P ; $N_A = 157$ - Число осередків, що покривають площу A

а допомогою методу покриття острова квадратною сіткою з розміром комірки δ знайдемо його периметр $P = N_p \cdot \delta$ та площу $A^{1/2} = N_A \cdot \delta$. При зменшенні розміру комірки периметр і площа зростають. Нахил прямої $\ln(A) - \ln(P)$, побудованої у подвійних логарифмічних координатах, відповідає співвідношенню $2/D$. У такому разі фрактальна розмірність визначається з рівняння

$$D = \frac{2 \cdot \ln(P_1 / P_2)}{\ln(A_1 / A_2)}. \quad (2.28)$$

У роботі [19] представлено порівняльну оцінку методів. Результати порівняльних досліджень наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Порівняльна оцінка методів

№	Тип обробки	D задана	Оцінка відрізками	Оцінка покриття	Метод Херста	Спектральна щільність	Периметр-площа
1	Фрезерування	1,3	1,295	1,283	1,279	1,289	2,42
2	Електроерозійна	1,25	1,262	1,229	1,285	1,262	2,31
3	Точіння чистове	1,2	1,232	1,17	1,34	1,22	2,24

З аналізу табл. 2.1 можна зробити висновок, що для визначення фрактальної розмірності профілю поверхні найбільш точними та простими у використанні є метод спектральної густини та метод «периметр-площа» – для визначення фрактальної розмірності 3D-поверхні.

2.7 Висновки за розділом

Представлено три основні типи методів: статистичні, спрямовані характеристики та фрактальні. Незважаючи на їхні відмінності, вони мають низку схожих ідей, що лежать в їхній основі.

Статистична характеристика має на меті перевести випадкову природу шорсткості поверхні в певну структуру. При цьому параметричний підхід забезпечує одиничні значення, які описують загальну висоту або просторові тенденції поверхні. Функціональні підходи надають візуальну структуру для опису шорсткості з більшою деталізацією, ніж окремі параметри, наприклад PSD зі спектральним описом різних хвиль, які складають шорстку поверхню.

Спрямована характеристика дозволяє враховувати анізотропію шорсткості на поверхнях, причому це не просто орієнтація профілів уздовж різних напрямків. Метод спрямованої шорсткості враховує всю поверхню, за винятком лише тих областей, які вважаються не контактуючими.

Фрактальні методи описують зв'язок шорсткості з різними масштабними явищами. Шорсткі поверхні розглядаються як самоафінні фрактали, які описуються за допомогою фрактальної розмірності. PSD також підходить для опису фрактальної характеристики. Відмінності в підходах цих методів слід особливо враховувати під час їхнього застосування на практиці.

Шорсткість важко оцінити кількісно, особливо тому, що дані залежать від суб'єктивного досвіду. Розглянуті характеристики шорсткості можуть застосовуватися для прогнозування міцності на зсув, оцінки апертури для аналізу течії рідини та створення віртуальних шорстких поверхонь.

РОЗДІЛ 3

ПРОГНОЗУВАННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ЛЕЗОВІЙ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ

У процесі виконання робіт із механічної або іншої обробки деталей існують дві взаємопов'язані та взаємовиключні проблеми. Перша проблема — це забезпечення якості обробки відповідно до технічних умов, друга — максимізація продуктивності обробки за наявних ресурсів. Спільне вирішення обох завдань досягається для наявного обладнання за рахунок правильного вибору технологічних параметрів процесу.

У більшості випадків вибір рішення визначається нормативними документами, загальноприйнятими уявленнями про процеси, що відбуваються під час обробки, та досвідом інженерів. Насправді завдання є вкрай складним, багатофакторним і піддається впливу випадкових процесів.

Для достовірного та якісного вирішення цього завдання дослідники моделюють ці проблеми та процеси, імітуючи умови взаємодії з метою встановлення закономірностей, які дозволяють забезпечити високу продуктивність за гарантованої якості виробу. З іншого боку, розвиток виробництва постійно висуває все вищі вимоги до якості обробки та підвищення її продуктивності. Це вимагає від учених створення нових або вдосконалення вже існуючих моделей, що дозволяють точніше прогнозувати умови роботи та кінцевий результат.

3.1 Практична сторона моделювання шорсткості поверхні після обробки

Шорсткість поверхні є одним із головних показників якості виготовлення продукції і, у більшості випадків, основною технічною вимогою до виробів, отриманих у процесі механічної обробки. Фактори, які безпосередньо впливають на шорсткість, можна розділити на чотири групи:

- технологічні параметри обробки;
- параметри різального інструмента;
- фізико-механічні властивості заготовки;
- явища, що виникають у процесі обробки в системі верстат-інструмент-пристосування-деталь.

Кожен із цих факторів залежить від власних параметрів, які певним чином впливають на кінцеве значення шорсткості. Прийнято вважати, що до технологічних параметрів обробки належать:

- подача, глибина та швидкість різання;

- наявність або відсутність мастильно-охолоджувальної рідини;
- загальна кінематика процесу, включаючи зупинки та відновлення обробки.

До параметрів різального інструменту відносять:

- матеріал різальної частини та крайок, зокрема покриття;
- форма інструмента, кути заточування та радіус заокруглення різальної вершини;
- знос інструмента;
- дисбаланс та биття під час обробки.

Фізико-механічні властивості заготовки:

- геометричні (габаритні) розміри;
- фізична природа процесу руйнування та характер формування стружки;
- властивості матеріалу (поверхнева твердість, коефіцієнт тертя, модулі пружності, температурна стійкість, тощо).

Кінематика процесу, зупинка та відновлення процесу:

- вібрація та неточності налаштування верстата;
- нерівномірність формування сил різання.

Наявність такого великого числа факторів, що впливають на кінцеве значення шорсткості, робить вирішення прямої задачі практично неможливим. Тому моделювання процесу передбачення величини шорсткості базується на врахуванні тих факторів, які мають найбільш значущий вплив. Кожна модель разом із її перевагами та недоліками повинна сприяти формуванню адекватної та доступної інформації, щоб обрати той варіант, який найкраще відповідає конкретним вимогам практичних завдань.

3.2 Методи оцінки та прогнозування величини шорсткості

Виникнення шорсткості поверхні після обробки є результатом синергічного впливу низки факторів. Згідно з [3, 4], це відображення структури поверхневого шару матеріалу, що формується в процесі зняття припуску, і проявляється через силовий вплив, природу утворення стружки, кінематику процесу та стан різальних крайок інструмента. Усі ці фактори взаємодіють між собою, а їхній сумарний ефект призводить до появи шорсткості на обробленій поверхні.

На цей момент не існує усталеної класифікації методів оцінки та прогнозування шорсткості, проте є чіткий і якісний підхід, детально описаний у роботі [20].

Суть цього підходу полягає в тому, що автори виділили чотири основні методи аналізу та прогнозування шорсткості:

- *методи, засновані на теорії механічної обробки матеріалів*, для розробки аналітичних моделей і/або алгоритмів представлення обробленої поверхні;
- *методи, що досліджують вплив різних факторів шляхом проведення експериментів та аналізу їхніх результатів*;
- *методи, що використовують планований експеримент* для отримання оптимальних параметрів обробки;
- *методи, засновані на штучному інтелекті*, які дозволяють моделювати шорсткість на основі великих масивів даних.

3.2.1 Теоретичні методи, засновані на положеннях теорії механічної обробки

Ці методи оцінки виникнення шорсткості та прогнозування її кількісних характеристик ґрунтуються на класичних положеннях теорії механічної обробки матеріалів, зокрема теорії різання. Вони враховують такі аспекти, як контактна взаємодія, тертя та зношування ріжучих кромek інструмента. Методи використовують аналітичні моделі, математичні підходи та інструменти систем автоматизованого проектування (САПР). Також розроблені імітаційні моделі, які дозволяють відтворювати профілі оброблених поверхонь, візуалізуючи їхню топографію та оцінюючи параметри шорсткості.

Серед багаточисельних теоретичних підходів можна виділити два основних напрямки:

1. *Чисто геометричні моделі*, які описують шорсткість поверхні на основі математичних рівнянь і комп'ютерних представлень.
2. *Моделі, що пов'язують величину шорсткості з технологічними параметрами обробки*, зокрема умовами різання.

Зазначимо, що ці моделі мають обмежену сферу застосування і часто не забезпечують належної точності. Вони здебільшого описують характер та розподіл шорсткості лише в обмеженому діапазоні змін умов механічної обробки. Основним критерієм достовірності таких теоретичних підходів є їх експериментальна перевірка. У різних довідниках з обробки матеріалів представлені методики для розрахунку шорсткості, проте точність прогнозованих результатів не завжди є гарантованою [21].

Наведемо приклади застосування теоретичних моделей. У роботі [22] автори виходили з припущення, що топографія обробленої поверхні формується завдяки накладу декількох процесів, кожен з яких має своє окреме значення.

Було розроблено метод прогнозування шорсткості поверхонь на основі двох моделей:

1. *Кінематика верстата*, що враховує рухи виконавчих механізмів.
2. *Модель геометрії ріжучого інструмента*, що описує інструмент через його ріжучі кромки та кути.

Цей підхід отримав назву «**система формування поверхні**». Він передбачає врахування не лише рухів механізмів верстата, а й похибок, що виникають під час обробки, таких як биття інструмента, вібрації, деформації та високочастотні коливання. Геометрія ріжучого інструмента описується через перетин передньої та задньої поверхонь, а також визначення відповідних кутів. На основі цієї моделі була створена система комп'ютерного моделювання, яка генерує тривимірні графічні зображення та дозволяє оцінювати шорсткість оброблених поверхонь

У роботі [23] застосовано трибологічний підхід, який полягає в тому, що контактна взаємодія на межі розподілу інструмент-стружка контролює формування шорсткості поверхні. Для моделі чистового точіння (традиційним різцем з однією вершиною) для прогнозування шорсткості поверхні використовувався параметр мінімальної товщини недеформованої стружки. Передбачалося, що одним із основних джерел розбіжностей між теоретичною та фактичною шорсткістю поверхні є відносно сильна адгезія на межі між гранню вершини інструмента та стружкою. Для математичного опису трибологічної взаємодії була використана молекулярно-механічна теорія тертя (теорія Крагельського) і теорія пластичності Ільюшина. Мінімальна товщина недеформованої стружки визначалась як величина, що відповідає переходу від «орання» поверхні до мікрорізання. Це дозволило значно наблизити розрахункові прогнозовані значення шорсткості до вимірянних.

Кілька вдало розроблених моделей, заснованих на положеннях теорії механічної обробки, були створені для операції торцевого шліфування. Так, у [24] було визнано, що шорсткість обробленої поверхні значною мірою залежить від подачі та биття пластин, що виникають при торцевому фрезеруванні. Через виробничі помилки при виготовленні фрез існують осьові (які впливають на глибину різання) та радіальні (які впливають на шорсткість поверхні) похибки, викликані биттям. Була розроблена математична модель для прогнозування шорсткості обробленої поверхні на основі інформації про биття пластини та параметри різання. На основі розрахункового значення шорсткості поверхні можна вибрати оптимальну швидкість подачі, яка забезпечує максимальну швидкість зняття матеріалу при заданому обмеженні на величину шорсткості поверхні.

У роботі [25] для визначення загального механізму формування поверхні для трьох різних типів кінцевих фрез: сферичної, округленої (тороподібної) та плоскої кінцевої фрези, запропонована узагальнена модель, де в якості змінної розглядається радіус округлення різальної кромки. Для оцінки шорсткості фрезерованих поверхонь використовується метод накладання текстур. За допомогою цієї процедури формується тривимірна текстура поверхні відповідно до заданих умов різання та типів фрез. Шорсткість поверхні визначається за максимальною висотою ефективного виступу, включаючи вплив слідів від різця та звичайних виступів. Урахування ефекту биття подано як геометричне і динамічне биття. Геометричне биття є наслідком наявності ексцентриситету осі фрези та нерівностей різальних кромки. Динамічне биття викликається вібрацією та відхиленнями в геометрії інструмента. Такий підхід дозволив наблизити прогнозовану поверхню до фактичної обробленої поверхні. У результаті експериментів на тривимірному обробному центрі була перевірена працездатність методу, яка дала задовільні результати.

У статті [26] представлена імітаційна модель топографії поверхні для моделювання профілю шорсткості поверхні, отриманої після токарної обробки. Модель враховує вплив геометрії інструмента, параметрів різання та відносного руху між різальним інструментом і заготовкою на профіль шорсткості поверхні, який був "розкладений" на три напрямки: радіальний, тангенціальний і осьовий. Експериментально показано, що імітаційна модель топографії поверхні може правильно моделювати профіль поверхні, що створюється в результаті токарних операцій. Імітаційна модель топографії поверхні використовується для вивчення впливу вібрацій на профіль шорсткості поверхні. Було показано, що відношення частот вібрації (FR), яке визначається як відношення частоти вібрації (в Гц) до швидкості обертання шпинделя (в об/хв), впливає на період хвилястості поверхні в осьовому напрямку. Встановлено, що відношення частот вібрації є більш важливим параметром, ніж частота вібрації, яка впливає на характеристики профілю шорсткості поверхні. Коефіцієнт частоти вібрації є співвідношенням між частотою вібрації і швидкістю обертання шпинделя. Також було виявлено, що вплив вібрацій у радіальному напрямку на показники шорсткості поверхні є значно більшим, ніж вплив вібрацій у тангенціальному напрямку або в осьовому напрямку, як і очікувалося.

Таким чином, представлені підходи до оцінки та прогнозування величини шорсткості, засновані на теоретичних дослідженнях, використовують моделі процесу різання з точки зору кінематики та властивостей різального інструмента. Однак цей підхід не враховує значну кількість факторів, які мають істотний вплив на шорсткість обробленої поверхні. Існують окремі спроби включити додаткові фактори, такі як прямі вібрації, теплові явища та знос інструмента, що

показали хорошу відповідність під час експериментальних перевірок. Проте в цілому, на даний момент математичні моделі не дозволяють з гарантією визначати величину шорсткості.

3.2.2 Методи, що досліджують вплив різних факторів на величину шорсткості на основі експериментальних досліджень і аналізу результатів

Експериментальний підхід до дослідження шорсткості залишається найбільш достовірним. Він ґрунтується на проведенні експериментів з найважливішими факторами, після чого отримані результати обробляються методами регресійного аналізу для оцінки впливу кожного фактора. Це часто є єдиним способом отримати якісну та кількісну картину явища, коли неможливо аналітично визначити причинно-наслідкові зв'язки між різними факторами.

У роботі [27] досліджували закономірності появи та розподілу величини шорсткості обробленої поверхні при точінні деталі з сталі AISI 304 з мінімальним використанням мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Використання МОР у зоні обробки допомагає зменшити виділення тепла в зоні контакту, що, в свою чергу, впливає на якість отриманої поверхні. Для цього використовували МОР, збагачену наночастинками оксиду алюмінію, двох середніх розмірів – 30 і 40 нм. Вибраними вхідними параметрами для дослідження були: швидкість різання, глибина різання, швидкість подачі та концентрація наночастинок в МОР. При плануванні експерименту використовувався підхід поверхні відгуку (RSM). Для оцінки шорсткості поверхні і порівняння експериментальних та прогнозованих (розрахункових) значень використовували три моделі машинного навчання: лінійна регресія (LR), метод «випадкового лісу» (RF) та метод опорних векторів (SVM). Точність прогнозованих значень визначалася з використанням коефіцієнта детермінації (R^2), середньої абсолютної процентної помилки (MAPE) та середньоквадратичної помилки (MSE). Метод RF перевершив дві інші моделі за точністю як з розміром часток 30, так і з 40 нм, з $R^2 = 0,8176$ і $0,7231$ відповідно. Новий підхід до прогнозування шорсткості поверхні ґрунтується на варіюванні кількості та розміру часток в МОР з використанням машинного навчання, що дозволяє покращити шорсткість обробленої поверхні та зекономити час обробки.

У роботі [28] розглядається використання «машинного зору» для визначення шорсткості при перевірці якості обробки на основі візуалізації. Ідея дослідження полягає в тому, що традиційні методи вимірювання шорсткості поверхні можуть бути непридатними в галузях, що вимагають 100 %-го контролю, через витрати та час на вимірювання. Машинне зір може забезпечити автоматизоване, економічне, швидке та надійне рішення для оцінки шорсткості

поверхні (R_a), що є загальновизнаним показником якості поверхні. В статті представлені характеристики текстури відшліфованих вручну поверхонь з використанням підходу машинного зору, а також оцінка їх шорсткості за допомогою регресійної моделі, заснованої на параметрах машинного зору. Для побудови регресійної моделі були вибрані стандартні набори каліброваних поверхонь вільного шліфування. Зображення поверхні збираються за допомогою програмного забезпечення MATLAB і обробляються для визначення характеристик текстури з використанням матриці спільної зустрічності рівня сірого (GLCM). Далі в програмному забезпеченні SPSS виконується аналіз головних компонент для визначення напрямків відхилень у характеристиках GLCM. Крім того, взаємозв'язок між значенням шорсткості поверхні і основними компонентами на основі особливостей GLCM моделюється за допомогою множинного регресійного аналізу. Розроблена регресійна модель може використовуватися для прогнозування невідомих значень шорсткості для зразків, відшліфованих вручну. Демонстрований підхід забезпечується використанням автоматизованого методу безконтактного типу для вимірювання шорсткості поверхні.

Дослідження системи машинного зору також розглянуто в роботі [3.11], де представлена система для фіксації зображень. Параметри текстурних об'єктів видобуваються за допомогою матриці спільної зустрічності рівня сірого і корелюються з різними параметрами шорсткості поверхні, що реєструються контактним профілометром. Отримання зображення виконувалось для різних рівнів шорсткості, щоб виявити особливості текстури. Для прогнозування оцінки параметра шорсткості поверхні (R_a) використовуються різні регресійні моделі. Зазначено, що модель лінійного виявлення має кращі характеристики продуктивності порівняно з моделлю нелінійного виявлення. Порівняння вимірюваних та прогнозованих результатів показало, що лінійна модель виявлення мала максимальну відносну помилку 2,01%, що значно краще, ніж нелінійна модель виявлення з помилкою -9,60%. Результати показують, що прогнозування шорсткості поверхні за допомогою моделі лінійної регресії є ефективним та надійним підходом для безконтактного вимірювання.

У дослідженні [30] розглянуто вплив вібрацій на контроль і прогнозування кінцевої якості обробленої поверхні. У роботі вимірювалися сигнали вібрацій уздовж основного напрямку сили різання під час токарної обробки за різних комбінацій швидкостей різання, подачі і глибини різання, використовуючи п'єзоелектричний акселерометр. Отримані сигнали оброблялися для виділення характеристик у часовій і частотній областях, таких як статистичні параметри, спектральні характеристики швидкого перетворення Фур'є та різні компоненти вейвлет-аналізу. До отриманих ознак застосовували методи зменшення

розмірності, а потім – алгоритми неконтрольованої кластеризації, стійкі до викидів, та скороченого набору ознак. Метою було визначити, чи відповідають розділення, створені алгоритмами кластеризації, експериментальним даним про шорсткість поверхні для конкретних умов різання. Дослідники досягли точності 75% у прогнозуванні якості поверхні за допомогою алгоритмів кластеризації Noise Clustering Fuzzy C-Means (NC-FCM) і DBSCAN, а також понад 80% точності у виявленні викидів. Загалом методи-оболонки (wrapped-method), що використовуються для вибору ознак, виявилися ефективнішими за методи фільтрації (filter methods). Результати продемонстровані для систем моніторингу процесу токарної обробки сталі в реальному часі.

У роботі [31] запропоновано нову модель прогнозування шорсткості поверхні на основі єдності функцій сигналу Fusion d і архітектури глибокого навчання. Сигнали від сили та вібрацій, що виникають під час фрезерування штампувальної сталі P20, вимірюються та накопичуються. Отримані сигнали обробляються через варіаційне модальне розкладання, виділяючи часові й частотні характеристики. Для вибору ознак сигналу використовується алгоритм GA-MI, що відповідає шорсткості поверхні заготовки. Оптимальне підмножина ознак аналізується та використовується як вхідні дані моделі прогнозування. Для оцінки шорсткості використовується DBN (глибока нейронна мережа), а параметри моделі оптимізуються методом ISSA. Інформація про силу, вібрації та сигнали вводиться в моделі DBN і ISSA-DBN для прогнозування шорсткості поверхні. Результати показали точність прогнозування для DBN: 78,1%, 68,8% і 84,4% та для ISSA-DBN: 93,8%, 87,5% і 100%.

Існуюча методика вимірювання шорсткості поверхні за допомогою машинного зору має два характерні недоліки. По-перше, вона передбачає отримання зображення в градаціях сірого без врахування високої чутливості до кольорової інформації. По-друге, у більшості таких вимірювань використовується метод мікровізуальної візуалізації для аналізу невеликої площі поверхні, що унеможливорює загальну оцінку шорсткості поверхні заготовки.

У дослідженні [32] запропоновано метод, що використовує звичайне джерело світла та перспективу макровізуалізації для створення індексів червоного та зеленого кольорів для кожного пікселя. Порівняльний тест проводився на наборі зразків до та після забруднення поверхні із застосуванням показника кольору, алгебраїчного усереднення рівня сірого, квадрата головної компоненти перетворення Фур'є у частотній області та ентропії. Результати показали сильну кореляцію між показником кольору та шорсткістю поверхні, яка виявилася вищою за інші індекси. Крім того, ця кореляція демонструє високу стійкість навіть за умов забруднення поверхні. Перевірка за допомогою регресійної моделі на основі методу опорних векторів підтвердила, що

запропонований підхід спрощує вимірювання, забезпечує високу точність і придатний для широкого діапазону умов. У статті також оцінено вплив червоних і зелених кольорових блоків, освітлення та напрямку текстури поверхні на кореляцію між показником кольору та шорсткістю. Запропонований метод пропонує спрощення апаратури, надійність у складних умовах та високий потенціал для впровадження у промислових застосуваннях.

У дослідженні [33] представлено моделювання шорсткості поверхні оброблених деталей на основі параметрів різання (швидкість обертання шпинделя, глибина різання та подача) та вібрації, що виникає під час кінцевого фрезерування. Прогностичні моделі було розроблено за допомогою методів множинного регресійного аналізу та підходу штучних нейронних мереж (ANN). Щоб зменшити вплив вібрації, випробування проводилися за різних параметрів різання, які визначалися у стабільних областях роботи фрезерного інструмента. Шорсткість поверхні та рівень вібрації моделювалися за допомогою нелінійних квадратичних моделей, побудованих на основі параметрів різання та їх взаємодії. Дисперсійний аналіз (ANOVA) використовувався для оцінки впливу кожного параметра різання на шорсткість поверхні. Результати показали, що швидкість обертання шпинделя та глибина різання є ключовими факторами, які суттєво впливають на якість поверхні. При порівнянні точності прогнозування моделей виявлено, що ANN значно перевершує моделі множинної регресії. Зокрема, для навчальних даних моделі ANN досягли коефіцієнта кореляції $R=0,96$ із середньоквадратичною похибкою (RMSE) 3,0%, тоді як моделі регресії мали $R=0,82$ і $RMSE = 7,57\%$. Для перевірки точності моделей було проведено незалежні тести. Результати підтвердили, що моделі ANN, засновані на параметрах різання та механічній вібрації, забезпечують середню точність прогнозування 93,14%, що перевищує точність моделей, які враховують лише три параметри різання. Крім того, було успішно продемонстровано можливість використання прогновної моделі як основи для розробки онлайн-системи визначення шорсткості поверхні, перевіреної на тестах із фрезерування контурної поверхні. Це дослідження підтвердило, що моделі прогнозування, створені з урахуванням стабільності умов різання, можуть забезпечити високу точність оцінювання процесу фрезерування.

У дослідженні [34] було розглянуто прогнозування шорсткості поверхні заготовок із титанового сплаву при надточній механічній обробці. Шорсткість вимірювалася під час експериментів із торцевого фрезерування. Для прогнозування використовувалася модель нейронної мережі глибокого навчання, побудована на основі архітектури ResNet-50. Для підвищення точності було запропоновано використовувати різницю співвідношень енергій (ERD) як показник стабільності, який визначається за допомогою методу швидкого

ітеративного варіаційного модального розкладу (FI-VMD). Шорсткість, розрахована аналітичною моделлю, також додавалася як вхідна характеристика для прогнозування. Це підвищило точність моделі на 8,7%. Досліджувалася також стійкість моделі до похибок геометричних параметрів інструменту, і запропонована гібридна модель виявилася більш стійкою, ніж аналітична.

У статті [35] представлено модель штучної нейронної мережі (ANN) для прогнозування шорсткості поверхні під час механічної обробки. На основі огляду літератури було визначено можливості та обмеження ANN у цьому контексті. У статті розглядаються основні елементи, необхідні для прогнозування шорсткості поверхні, зокрема в процесі фрезерування. Експеримент включав 24 набори даних фрезерування: 8 даних двофакторного аналізу DOE 2k, 4 центральні дані та 12 осьових. Дані збиралися за реальних умов обробки із використанням інструментів з титанових сплавів (Ti-6Al-4V) без покриття, з покриттям TiAlN і SNTR. Аналіз даних проводився в Matlab з використанням алгоритму зворотного поширення помилки з функціями *trainidx* і *leargdx* для навчання, а також MSE і *logsig* для оцінки та передачі. Було встановлено, що структура мережі для інструмента з покриттям SNTR забезпечує найкращі результати прогнозування. Зроблено висновок, що покращення точності прогнозування шорсткості можливе завдяки модифікації кількості шарів і вузлів у прихованих шарах ANN. Оптимальними умовами різання для досягнення мінімальної шорсткості виявилися висока швидкість різання та низька швидкість подачі.

Ймовірнісні моделі вважаються найбільш відповідними для прогнозування шорсткості поверхні деталей, що шліфуються. У більшості таких моделей не враховується систематичний вплив ефекту «переорювання» поверхні. У дослідженні [36] детально розглянуто накопичення гребенів у результаті цього ефекту, їхнє перекриття та внесок у ймовірнісну модель. Коли відстань між сусідніми канавками, залишеними абразивними зернами на поверхні заготовки, змінюється, гребені можуть перекриватися або канавки перетинаються. Різні режими взаємодії канавок та виступів обговорюються в контексті ймовірнісної моделі прогнозування шорсткості поверхні. Для розрахунків застосовано удосконалений метод Пауелла. Експериментальні результати шліфування показали, що прогнозовані значення узгоджуються з виміряними із середньою точністю прогнозування 90,4%.

У статті [37] запропоновано інтегрований алгоритм для моделювання формування шорсткості поверхні під час фрезерування та подальшого полірування. Алгоритм дозволяє прогнозувати початкову шорсткість, що виникає при фрезеруванні, та її зміну після полірування. Він базується на використанні хмар точок, сформованих у зоні контакту інструмента із

заготовкою, та їхньому перетворенні між системами координат інструмента і заготовки. Для підвищення точності до алгоритму включено механічні характеристики процесу, зокрема вплив поверхневого зміцнення та пружного відновлення деформованого шару. Експерименти з полірування багатороликовим інструментом показали, що додавання ефекту зміцнення та пружності підвищує точність прогнозування шорсткості на субмікронному рівні на 50%. Ключовими параметрами, що впливають на кінцеву шорсткість після комбінації фрезерування-полірування, є початкова шорсткість після фрезерування, сила полірування та кількість проходів. Полірування після грубої обробки вимагає значної енергії для досягнення нанорозмірної чистоти поверхні, тому послідовність грубого та чистового фрезерування з наступним поліруванням забезпечує якісну обробку за менший час.

Стаття [38] присвячена розробці підходу, що поєднує відомі фізичні знання із можливостями глибокого навчання для прогнозування шорсткості поверхні заготовок після фрезерування, враховуючи обмеження фізичних законів. Для обробки обмежених експериментальних даних було застосовано доповнення набору даних шляхом побудови моделей механізму утворення шорсткості з прийнятною точністю до початку навчання. В ході роботи створено фізично керовану функцію втрат, яка спрямовує процес навчання моделі, враховуючи фізичні знання. Як базову модель для прогнозування шорсткості використано CNN-GRU, яка поєднує можливості згорткових нейронних мереж (CNN) для виявлення особливостей із вентилями рекурентними блоками (GRU) для обробки часових залежностей. Для поліпшення кореляції даних інтегровано двонаправлений вентилюваний рекурентний блок і багатофункціональний механізм саморегулювання. Експерименти проводилися на даних з відкритим кодом S45C та GAMHE 5.0, і модель показала найвищу точність прогнозування серед сучасних методів. Середня абсолютна відносна похибка на тестовому наборі зменшилася на 3,029% порівняно з найкращими аналогами

Традиційний експериментальний підхід залишається базовим для вивчення процесів утворення шорсткості та впливових чинників. Практична реалізація таких експериментів не потребує складного обладнання чи значних організаційних зусиль. Проте отримані результати справедливі лише в обмеженому діапазоні зміни чинників, і врахування великої кількості змінних не завжди гарантує високу якість прогнозування.

3.3 Основні методології для проведення планованого експерименту з визначення шорсткості після обробки

Сенс методології запланованих експериментів у тому, що це систематичний підхід до проведення експериментів, збору та аналізу даних із максимально можливим використанням доступних ресурсів. В даний час найбільш широко використовуються дві методології: методологія поверхні відгуку (RSM) та методи Тагучі планованого експерименту (DoE). Вони є не тільки найбільш поширеними методологіями вирішення проблеми прогнозування шорсткості поверхні, але й простими у реалізації та аналізі отриманих результатів.

3.3.1 Метод поверхні відгуку (RSM)

Першочергово обираються фактори, які вважаються найбільш важливими. Припускається, що ці змінні є безперервними і можуть контролюватися експериментатором із мінімальною похибкою. З використанням цих змінних будуються поліноміальні залежності, де незалежною змінною виступає реакція експерименту — відгук, який є випадковою величиною. Сукупність отриманих значень, відома як поверхня відгуку, аналізується за допомогою математичних методів. На основі експериментальних даних підбирається найоптимальніша модель досліджуваного процесу. Після цього можна визначити вплив кожного окремого фактора на відгук (функцію).

Алгоритми RSM у більшості випадків включають два етапи вирішення задачі. На першому етапі як форма невідомої функції використовується її лінійне представлення. Якщо відгук добре описується лінійною функцією незалежних змінних, апроксимуючою функцією стає модель першого порядку

$$R_z = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n \quad (3.1)$$

Якщо в результаті аналізу з'ясовується, що лінійна апроксимація дає незадовільний результат, необхідно використовувати поліноми вищого порядку, наприклад, другого

$$R_z = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + b_1 \cdot X_1^2 + b_2 \cdot X_2^2 + \dots + c_1 \cdot X_1 \cdot X_2 + \dots \quad (3.2)$$

Метод поверхні відгуку (RSM) у більшості випадків використовує поліноми як першого, так і другого порядку, тоді як поліноми вищих порядків

застосовуються вкрай рідко. Щодо точності побудованої апроксимації, то на практиці поліноміальні моделі не завжди забезпечують задовільний результат для всієї області дослідження, але у вузьких діапазонах вони демонструють прийнятну точність.

Для оцінювання коефіцієнтів апроксимуючих поліномів застосовується метод найменших квадратів (МНК). Після цього проводиться аналіз поверхні на відповідність отриманої апроксимації реальним даним, і рішення приймається або відхиляється як задовільне. Для підвищення ефективності пошуку та оцінки впливу факторів використовуються спеціальні експериментальні плани, які називають планами для дослідження поверхні відгуку.

Кінцевою метою дослідження поверхні відгуку є визначення оптимальних робочих умов системи або області простору зміни факторів. Для знаходження глобального мінімуму відгуку плануються й виконуються експерименти, що дозволяють "обрізати" поверхню відгуку, а градієнт поверхні використовується разом із алгоритмом найшвидшого підйому чи спуску.

Метод поверхні відгуку широко описаний у літературі, наприклад, у [39], і реалізований як стандартний інструмент у багатьох математичних пакетах.

Відповідно до алгоритму методу поверхні відгуку (RSM) розрахунки виконуються за такою процедурою.

На першому етапі проводять наступні операції:

- *вибір факторів*: визначаються основні фактори, які потрібно дослідити;
- *двохрівневий факторний експеримент*: проводиться у локалізованій області поверхні відгуку;
- *оцінка ефектів*: розраховуються оцінки впливу факторів і визначаються коефіцієнти лінійної моделі (3.1);
- *вибір еталонного фактора*: встановлюється один із факторів як орієнтир для визначення відповідних кроків у напрямку кожного фактора, щоб рухатися вздовж шляху найбільшого градієнта;
- *експериментальні умови*: обираються кілька умов експерименту вздовж шляху найбільшого градієнта, і проводяться випробування для перевірки, чи продовжує зростати реакція. Якщо відгук перестає збільшуватися, створюється новий шлях пошуку;
- *новий шлях*: у разі потреби проводиться новий дворівневий факторний експеримент, і всі попередні дії повторюються до досягнення суттєвого покращення відгуку.

Після цього проводиться другий етап, на якому:

- *трьохрівневий факторний експеримент*: виконується в області, де шлях найбільшого градієнта не дає значного покращення відгуку;
- *обчислення коефіцієнтів*: визначаються коефіцієнти моделі (3.2);

– *характер стаціонарної точки*: на основі моделі (3.2) визначається характер стаціонарної точки поверхні відгуку. Стаціонарна точка — це точка, у якій градієнт близький до нуля.

Послідовний характер методу поверхні відгуку (RSM) дозволяє досліднику поступово отримувати інформацію про процес або систему в ході експериментів. Це забезпечує отримання відповідей на такі важливі питання:

- *кількість повторень*: скільки повторень необхідно для отримання статистично достовірних результатів?
- *Розташування області оптимуму*: у якій області знаходиться оптимальне значення відгуку?
- *Тип апроксимуючої функції*: яка функція найкраще описує залежність між факторами та відгуком?
- *Адекватність планування експериментів*: чи були правильно обрані експериментальні плани, чи потрібно скоригувати підхід?
- *Потреба в трансформації*: чи необхідно перетворювати відгуки або змінні процесу для підвищення точності моделювання?

3.3.2 Методологія (концепція) Тагучі (DoE)

Методологія Тагучі, або Design of Experiments (DoE), є ефективним підходом до оптимізації показників якості, що широко застосовується для контролю та покращення якості виробничих процесів або продукції. Основні ідеї цієї методології можна сформулювати так:

- *закладка якості у продукт*: якість повинна бути інтегрована у продукт на етапі його розробки, а не перевірятися лише під час виготовлення чи після завершення виробництва;
- *мінімізація відхилень від цільових параметрів*: найвища якість досягається шляхом зменшення варіацій параметрів продукції, що забезпечує стійкість до неконтрольованих факторів навколишнього середовища;
- *оцінка вартості якості*: вартість якості вимірюється як функція відхилень від встановлених стандартів, а втрати оцінюються в масштабах усієї системи.

Ця концепція спрямована на те, щоб зменшити чутливість процесу або продукту до зовнішніх впливів, забезпечуючи стабільність результатів та знижуючи витрати, пов'язані з дефектами або відхиленнями.

Метод Тагучі поєднує теорію планування експериментів та функцію втрат якості для раціонального проектування операцій, виробів і процесів. На рисунку 3.1 зображена квадратична функція втрат якості Тагучі.



Рисунок 3.1 – Квадратична функція втрат Тагучі

Метод ґрунтується на використанні спеціальної конструкції ортогональних масивів для дослідження всього простору зміни факторів (параметрів), використовуючи обмежену кількість експериментів.

Згідно з теорією методу, зміна якісної характеристики продукту під дією фактора, введеного в схему експерименту, називається «Сигналом бажаного ефекту». Вплив зовнішніх факторів на результат досліджуваної характеристики якості називається «Шумом». Для використання функції втрат як показника якості необхідно описати відповідну функцію втрат із її сталою втрат, що не завжди є економічно ефективним і простим завданням. Результати експериментів перетворюються на відношення «Сигнал/Шум (S/N)». Тагучі рекомендує використовувати співвідношення S/N для вимірювання якісних характеристик, що відхиляються від бажаного значення. Співвідношення S/N для кожного рівня параметрів процесу розраховується на основі аналізу S/N і перетворюється в єдиний показник. Метою кожного експерименту є визначення максимально можливого відношення S/N для результату, незалежно від типу якісних характеристик.

Високе значення відношення S/N означає, що сигнал значно перевищує випадковий вплив факторів шуму. Тому співвідношення S/N використовується як переважна характеристика якості.

Згідно з ідеологією методу Тагучі, існують три види якісних характеристик:

- *номінальний показник* (Nominal-is-the-Best): найкращий (NB) або цільовий показник (Target-is-the-Best): найкращий (TB);
- *нижній показник* (Lower-the-Better): найкращий (LB);

– *верхній показник* (Higher-the-Better): найкращий (НВ).

Для першого типу «номінальний показник є найкращим (НВ)» або «цільовий показник є найкращим (ТВ)», чим ближче до цільового значення, тим краще якість. Не має значення, чи відхилення більше або менше за цільове значення. При цьому відхилення розглядається як квадратичне. На рис. 3.2 показана функція втрат якості для типу «Номінально-кращий (НВ)» характеристики.

Формула цих характеристик (3.3):

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{y}{S_y^2}, \quad (3.3)$$

де y – дані спостережень чи вимірів, S_y^2 – дисперсія даних y .



Рисунок 3.2 – Характеристики НВ або ТВ

Підхід «LB» застосовується, коли для параметрів потрібні менші значення, оскільки з ростом вартості можливі втрати зростатимуть, як показано на рис. 3.3, а.

Формула цієї характеристики (3.4):

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \sum y^2, \quad (3.4)$$

де n - Число спостережень або вимірювань.

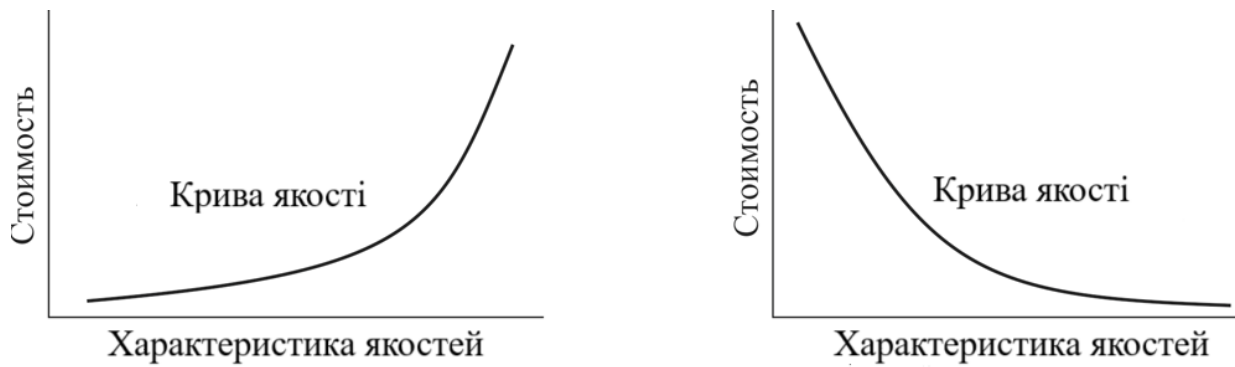


Рисунок 3.3 – Функція втрати якості: а – характеристика LB;
б - характеристика "НВ"

Принцип «НВ» використовується, коли для якісних характеристик потрібні вищі значення параметрів, тобто чим більше характеристичне значення, тим менші втрати якості. На рис. 3.4 показано характеристику «НВ» та відповідну функцію втрат якості.

Формула цієї характеристики (3.5)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2}. \quad (3.5)$$

Підхід Тагучі можна розподілити на три етапи, які потрібно виконати під час експерименту для поліпшення розуміння якості параметрів виробу, операції чи процесу.

На етапі планування необхідно виконати такі операції:

- сформулювати загальну постановку задачі;
- сформулювати цілі експерименту;
- вибрати якісні характеристики процесу та визначитися із системою вимірювання;
- визначити фактори, що впливають і ті, які можуть вплинути на значення якісних характеристик;
- призначити рівні факторів;
- здійснити вибір відповідних дробових матриць Тагучі або ортогональних масивів (ОМ);
- визначити взаємодії факторів, що можуть вплинути на якісну характеристику.

На етапі виконання необхідно провести повторення експерименту згідно з ОМ.

На етапі аналізу потрібно оцінити результати, наприклад, з використанням дисперсійного аналізу і, якщо необхідно, провести підтверджуючий експеримент.

Існує три типи ОМ, які мають справу з факторами двох рівнів, факторами трьох рівнів та факторами змішаного рівня. Вибір необхідного ОМ повинен враховувати та ґрунтуватися на наступних критеріях:

- кількість факторів і взаємодій, що представляють інтерес;
- кількість рівнів факторів, що цікавлять;
- бажане експериментальне розділення або обмеження за вартістю.

Перші два критерії визначають найменший ОМ, який можна використовувати, а третій дозволяє провести більш масштабний експеримент з вищим розділенням. Розділення може варіюватися від 1 (найнижче) до 4 (найвище) і вказує на важливість кожного фактора, при якому кожен окремий ефект факторів і взаємодій може бути оцінений в експерименті.

Щоб призначити різні коефіцієнти стовпцям ОМ, необхідно враховувати наступну математичну властивість: якщо одному фактору присвоєно конкретний стовпець, а іншому — інший стовпець, то автоматично третій стовпець отримає взаємодію цих факторів. Шаблон того, які стовпці будуть стовпцями взаємодій, відомий для всіх ОМ і візуалізується за допомогою таблиць взаємодій і лінійних графіків.

3.3.3 Огляд планування експериментів і досліджень, з використанням RSM і підходу Тагучі для оцінки шорсткості поверхні

В оглядовій роботі [40] детально розглянута проблема оптимізації параметрів процесу механічної обробки для мінімізації шорсткості поверхні, а також питання прогнозування її величини. Всі різні підходи мають загальну мету – визначення взаємозв'язків між вхідними параметрами обробки та шорсткістю вихідної поверхні. Для прогнозування продуктивності та якості обробки все частіше використовуються емпіричні методи на основі штучного інтелекту (AI), які на основі вивчення експериментальних даних дозволяють розпізнавати та усувати неточності й невизначеності в самому процесі обробки. У статті розглянуті різні емпіричні методи на основі AI, які використовують шорсткість поверхні як змінну відгуку для операцій точіння та фрезерування. Метою роботи було проведення аналізу та оцінки літератури з моделювання процесу обробки з точки зору зв'язку з шорсткістю поверхні.

У роботі [41] представлена математична модель залежності величини шорсткості від форми (кривизни) оброблюваної поверхні. Показано, що орієнтація осі інструменту та змінна кривизна оброблюваного профілю мають

суттєвий вплив на шорсткість і топографію поверхні в процесі 5-координатного фрезерування за допомогою тороїдальної фрези. Вибір орієнтації осі тороїдальної фрези відносно радіуса кривизни профілю обробленої поверхні є дуже важливим, оскільки це може забезпечити кращу якість поверхні та рівномірний розподіл параметрів шорсткості. У цій роботі для отримання математичних залежностей проведені експериментальні дослідження по фрезеруванню турбінної лопатки турбіни з сплаву Inconel 718. У результаті були отримані співвідношення, які можуть бути застосовані в спеціалізованих модулях систем САМ (Computer Aided Manufacturing), що підтримують програмування 5-осьової обробки криволінійних поверхонь. Розроблені моделі дозволили досягти рівномірності розподілу шорсткості на обробленій поверхні турбінних лопаток з сплаву Inconel 718, що підтверджується порівнянням з результатами випробувань.

У статті [42] розглядається адитивне виробництво (АВ), яке в останній час стало досить популярним. Цей метод використовує 3D-модель САД для виготовлення деталі методом послідовного осадження шарів, що призводить до утворення ефекту сходів на поверхні деталі, що, в свою чергу, збільшує шорсткість поверхні. Пропонується вирішення цієї проблеми на етапі попередньої обробки, прогножуючи значення шорсткості на кожній стадії виготовлення. У статті порівнюються існуючі моделі прогнозування шорсткості поверхні з запропонованою моделлю, а також обговорюються перспективи подальших досліджень у цій галузі.

У дослідженні [43] представлена модель прогнозування шорсткості поверхні на основі лінійної регресії та штучних нейронних мереж (ШНМ) для кількох типів структур моделей. В якості вхідних даних використовувалися різні характеристики, зокрема дані про силу, отримані безпосередньо з датчиків сили, а також дані про зібрану силу після статистичної обробки для зменшення розміру даних. Після проведення модельного прогнозування для збору даних сили для навчання та тестування моделі були проведені експериментальні дослідження на шліфувальному станку власної конструкції. Для оцінки ефективності прогнозування використовувалася середня абсолютна процентна помилка. Представлена нейронна мережа з трьома прихованими шарами виявилася найкращою і була покладена в основу моделі для прогнозування шорсткості поверхні під час шліфування.

У роботі [29] представлена система машинного зору, яка захоплює зображення та виділяє особливості текстури поверхні оброблених матеріалів. Параметри цих особливостей текстури отримуються за допомогою матриці супутніх подій в відтінках сірого і корелюються з різними параметрами шорсткості поверхні, виміряними контактним профілометром. Отримані

зображення аналізуються на різних рівнях шорсткості для виділення характерних текстур. Вивчається залежність між кожною особливістю текстури і параметром шорсткості поверхні. Розроблено кілька регресійних моделей для прогнозування оцінки параметра шорсткості (R_a) та визначення ступеня шорсткості поверхні. Встановлено, що лінійна модель прогнозування має кращі експлуатаційні характеристики порівняно з нелінійною. Порівняння виміряних і прогнозованих результатів показує, що лінійна модель має максимальну відносну помилку 2,01%, що значно краще за нелінійну модель з помилкою -9,60%, що свідчить про кращу здатність визначення поверхні в порівнянні з нелінійною моделлю. Результати показали, що прогнозування шорсткості поверхні за допомогою лінійної регресійної моделі є надійним методом безконтактного вимірювання.

У дослідженні [44] зосереджено увагу на розробці емпіричної моделі прогнозування шорсткості поверхні під час чистової токарної обробки. Модель враховує такі робочі параметри: твердість заготовки (матеріал), подача, кут нахилу різального інструмента, глибина різання, швидкість шпинделя та час різання. Для розробки моделі використовується нелінійний регресійний аналіз з логарифмічним перетворенням даних. Значення шорсткості поверхні, передбачені цією моделлю, перевіряються за допомогою додаткових експериментів і порівнюються з значеннями інших репрезентативних моделей з літератури. Експерименти та статистичні тести показали, що модель, розроблена в цій роботі, дає менші помилки, ніж деякі існуючі моделі, і має задовільну якість як на етапі побудови, так і перевірки моделі.

У роботі [45] пропонується віртуальна метрологічна модель для прогнозування шорсткості поверхні, що впливає на механічну потужність і технічні характеристики виробів. Запропонована модель використовує тришарову нейронну мережу зворотного поширення, використовуючи дані датчиків вібрації, сили та струму в реальному часі, зібрані під час обробки торцевим фрезеруванням. План пошуку сітки використовується для визначення кількості нейронів у середньому шарі нейронної мережі. Експериментальні результати показують, що модель з кількома входними сигналами працює краще, ніж з одним сигналом. Зокрема, коли входні дані моделі являють собою комбінацію даних датчиків сили, вібрації та струму, точність прогнозування досягає оптимального рівня з середньою абсолютною процентною помилкою 1,01%.

У порівнянні з сучасними методами на основі згорткових нейронних мереж, здатними автоматично витягувати ознаки, та іншими широко використовуваними традиційними методами машинного навчання, запропонована процедура попередньої обробки даних, інтегрована з

тришаровою нейронною мережею зворотного поширення, має мінімальну помилку прогнозування.

Прогнозуванню шорсткості поверхні під час абразивно-гідроабразивної обробки (AWJM) композитів з металевою матрицею (MMC) присвячене дослідження [46]. У роботі вивчається прогнозування шорсткості поверхні (R_a) через розробку регресійних і напівемпіричних моделей для AWJM неармованого сплаву Al 6063, а також сплавів Al 6063, армованих 5%, 10% і 15% частинками карбіду бора (B_4C). Відповідно, випробування AWJM проводилися за допомогою експериментального дизайну Бокса-Бенкена з контролем змінних процесу, таких як розмір осередку (ms), масової витрати (ma), тиску води (p) і швидкості переміщення (u), на трьох рівнях. Методологія поверхні відгуку (RSM) була застосована для формулювання регресійної моделі з використанням даних, отриманих в результаті експериментів. Результати, проаналізовані за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA), показали, що ms , тиск води і швидкість переміщення значно впливають на генерацію R_a . Експериментальні дослідження показали, що поєднання параметрів процесу, таких як $ms \# 120$, масовий витрат 340 г/хв, тиск води 275 МПа і швидкість переміщення 60 мм/хв, призводить до більш низького значення R_a . Використовуючи експериментальні значення та дані про властивості матеріалів, була розроблена напівемпірична модель за допомогою розмірного аналізу з використанням π -теореми Бекінгема. Прогнози за цими моделями добре корелюють з даними, отриманими в ході експериментів при відповідних умовах.

У [47] запропонована емпірична модель для прогнозування шорсткості поверхні в процесі механічної обробки при заданих умовах різання (швидкість, подача, глибина різання). Для заданого типу робочого інструмента діапазон умов різання вибирається з різних поєднань змінних параметрів різання. Ці умови різання застосовуються до методу факторного планування експериментів (DOE). Після проведення експериментів вимірюються значення шорсткості поверхні. Далі ці експериментальні результати використовуються для розробки емпіричної моделі для прогнозування шорсткості поверхні за допомогою методу множинної регресії.

Експериментальне дослідження шорсткості при токарній обробці нержавіючої сталі представлено в [48]. Використано метод центральної складної поверхні відгуку (RSM) та метод проектування Тагучі. Було проаналізовано вплив параметрів різання (швидкість різання, швидкість подачі та глибина різання) на шорсткість поверхні. Модель прогнозування шорсткості поверхні була створена на основі RSM другого порядку. На основі отриманих результатів коефіцієнт регресії оцінювався методом найменших квадратів. Проведено аналіз значущості для перевірки відповідності і аналізу поверхні відгуку, а також

створено карту поверхні відгуку і тривимірну карту поверхні. Термін служби обробного інструмента було проаналізовано на основі оптимізованих параметрів. Результати показали, що вплив подачі на шорсткість поверхні є найбільш суттєвим. Глибина різання займає друге місце, а вплив швидкості різання є найменшим. Термін служби інструмента аналізується для забезпечення ефективного і економічного різання важкооброблюваних матеріалів при умові забезпечення якості обробки.

В дослідженні [49] пропонується методологія покращення якості продукції адитивного виробництва (АМ) на основі аналізу даних. Цільовою якістю АМ є шорсткість поверхні укладеної стінки. Шорсткість поверхні є одним з важливих показників якості і може призвести до короткого терміну служби продукту та поганих експлуатаційних характеристик конструкції. Для контролю шорсткості поверхні необхідно заздалегідь прогнозувати результуючу шорсткість поверхні залежно від параметрів процесу. Різні методи аналізу, такі як попередня обробка даних і глибокі нейронні мережі (DNN) у поєднанні з даними датчиків, використовуються для прогнозування шорсткості поверхні в запропонованій методології. Пропонована методологія застосовується до польових даних від керованого дрютяного до електродугового (WAAM) адитивного виробництва. Результат аналізу показує високу ефективність з середньою абсолютною процентною помилкою (MAPE) 1,93%.

У статті [50] досліджується вплив технологічних параметрів обробки на шорсткість поверхонь, отриманих у процесі токарної обробки для трьох матеріалів: сталь EN8, алюмінієві та мідні сплави без використання охолодження. Для дослідження вибрано два основних параметри процесу — швидкість різання та подача, а також твердість матеріалу. Аналізувалося вплив збільшення подачі та зменшення швидкості різання при постійній глибині точіння на утворену шорсткість поверхні. Обробка експериментальних даних для регресійного аналізу проводилася з використанням програмного забезпечення MINITAB для всіх трьох матеріалів. Була розроблена математична модель прогнозування середньої шорсткості поверхні (R_a) з точки зору швидкості різання, подачі та твердості матеріалу, та отримано R^2 67,2% та 47,52%.

У роботі [51] розглядається оптимізація процесу обробки за допомогою дорогих інструментів, таких як полікристалічний кубічний нитрид бору, полікристалічний алмаз і кераміка, при високоякісній обробці з числовим програмним управлінням. Така обробка вимагає мінімізації експериментальних запусків для досягнення оптимальних умов різання з мінімальним зносом інструмента та загальною вартістю виробництва. Оптимізація процесу обробки для досягнення цих цілей включає вибір оптимальних параметрів шляхом

застосування точних і недорогих математичних моделей. У статті розглядаються різні методи моделювання та оптимізації, такі як лінійне регресійне моделювання, штучні нейронні мережі, поліноміальне та нечітке моделювання, а також оптимізація процесу за допомогою методу Тагучі, методології поверхні відгуку і генетичного алгоритму. Всі ці методи застосовуються для надання інженерам-технологам бази даних для порівняння відносних переваг і придатності цих методів у конкретних застосунках.

У дослідженні [52] розглядаються різні методи прогнозування шорсткості поверхні при чистовій обробці. Основними параметрами є умови різання, властивості різального інструмента та матеріалу заготовки. Методи чистової обробки, такі як точіння, фрезерування, шліфування, розточування і полірування, використовуються для досягнення бажаної шорсткості. Вибір параметрів інструменту є серйозною проблемою, що залежить від часу, вартості та практичних навичок. Методи прогнозування шорсткості спрямовані на скорочення часу вибору параметрів, зниження вартості обробки і досягнення бажаної якості.

У дослідженні [53] шорсткість поверхні вимірюється під час токарної обробки при різних параметрах різання, таких як швидкість, подача та глибина різання. Для підвищення надійності експериментальних даних реалізовано повний факторний експериментальний план. Для моделювання шорсткості поверхні сталі AISI 1040 використовуються штучні нейронні мережі (ШНМ) та підходи множинної регресії. Моделі множинної регресії та нейронні мережі порівнюються з використанням статистичних методів. Показано, що запропоновані моделі здатні прогнозувати шорсткість поверхні, причому модель ШНМ оцінює шорсткість з більшою точністю, порівняно з моделлю множинної регресії.

Дослідження [54] присвячено вивченню проблеми моделювання та прогнозування шорсткості поверхні як важливого параметра якості продукції, що впливає на характеристики підгонки з'єднаних компонентів, стійкість до корозії, втрати на тертя рідини в трубопроводах і на естетику продукту. Існують два основних типи моделювання: аналітичне та емпіричне. Аналітичне моделювання враховує здебільшого контрольовані фактори процесу, в той час як емпіричне моделювання використовує як контрольовані, так і неконтрольовані фактори, такі як вібрація, знос інструмента, тощо. У цьому дослідженні запропонована напівемпірична модель шорсткості поверхні для процесу кінцевого фрезерування на верстаті з ЧПУ, з використанням теореми Букінгема-Пі.

У роботі [55] представлений підхід до прогнозування шорсткості з урахуванням мікровідхилень. Існуючі імітаційні моделі для прогнозування

шорсткості поверхні заготовки при чистовій обробці засновані на ідеальному круглому профілі різальної кромки інструменту. Це призводить до єдиного прогнозованого значення шорсткості для заданого набору вхідних параметрів. У цій статті запропоновано підхід до моделювання, який враховує випадкові мікровідхилення профілю різальної кромки інструменту, а також вібрацію інструменту для прогнозування інтервалу шорсткості. Профілі різальної кромки, які використовуються в моделюванні, були отримані з зображень реальних вставок різального інструменту за допомогою субпіксельного визначення краю. Сигнал вібрації був відновлений з виміряних сигналів і накладений на отриманий профіль різальної кромки. Дані про шорсткість були обчислені для 24 змодельованих профілів поверхні заготовки і використані для визначення 95% інтервалу прогнозування шорсткості. Порівняння з експериментальними результатами показало, що 100%, 96% і 96% значень шорсткості R_t , R_a і R_q , отриманих експериментально, потрапляли в прогнозовані інтервали шорсткості.

У статті [56] розглядається метод пошарового наплавлення (FFF) або тривимірний друк (3D) як швидкі процеси прототипування для виготовлення заготовок. Існує багато факторів, які значно впливають на якість поверхні, серед яких температура столу, швидкість друку та товщина шару. Для дослідження зв'язку між цими факторами та середньою шорсткістю поверхні (R_a) було проведено емпіричне дослідження. Заготовки циліндричної форми були виготовлені за допомогою системи FFF з ниткою полімолочної кислоти (PLA). Шорсткість поверхні вимірювалася в п'яти різних точках на нижній і верхній поверхні. Для розробки експерименту та статистичного прогнозування реакції використовувався метод поверхні відгуку Бокса-Бенкена. Загалом було проведено шістнадцять обробок, причому для кожної обробки виконувалося п'ять вимірів. Налаштування кожного фактора включали температуру шару 80, 85 і 90 °C, швидкість друку 40, 80 і 120 мм/с та товщину шару 0,10, 0,25 і 0,40 мм. З аналізу було отримано рівняння прогнозування шорсткості поверхні. Той самий набір даних використовувався як вхід для методу машинного навчання — штучної нейронної мережі, щоб побудувати рівняння прогнозування шорсткості поверхні. У ШНМ використовувався виразний лінійний блок (ReLU) як функція активації. Для навчання багатоваріантних перцептронів застосовувалися два алгоритми навчання: стабільне зворотне поширення з відстеженням ваги та глобально збіжне стабільне зворотне поширення. Також досліджувалося і порівнювалося різну кількість нейронів у кожному прихованому шарі. Було проведено порівняння помилок прогнозування для кожного методу, щоб оцінити ефективність двох методів прогнозування: Бокса-Бенкена та ШНМ.

У дослідженні [57] розглядається проблема прогнозування шорсткості поверхні при обробці полікристалічних матеріалів. Шорсткість їх поверхні має

значний вплив на робочі характеристики, а дефекти матеріалу інструменту, зокрема на межах зерен, впливають на досягну шорсткість поверхні полікристалічних матеріалів. Теоретична модель шорсткості поверхні з урахуванням ефекту меж зерен за допомогою звичайних аналітичних методів відсутня і навряд чи може бути реалізована. У роботі запропоновано гібридну модель глибокого навчання для прогнозування шорсткості поверхні полікристалічних матеріалів, оброблених алмазним точінням. Теоретично розраховуються кінематична та динамічна компоненти шорсткості, що залежать від ефекту дублювання профілю інструмента, пластичного бічного потоку оброблюваного матеріалу, відносної вібрації між алмазним інструментом і оброблюваною деталлю та інших факторів. Компонента шорсткості матеріал-дефект моделюється за допомогою каскадної нейронної мережі прямої дії. У нейронній мережі як вхідні змінні налаштовуються максимальна недеформована товщина стружки відносно радіусу різця (RTS), властивості оброблюваного матеріалу (кут розорієнтації θ_g та розмір зерна dg) і швидкість обертання шпинделя n . Для перевірки розробленої моделі була використана полікристалічна мідь з градієнтним розподілом зерен, оброблена методом тертя з перемішуванням, з різними технологічними параметрами і алмазними інструментами. На основі моделі обговорюється вплив різних факторів на шорсткість поверхні полікристалічних матеріалів, а також кількісно аналізується механізм впливу кута розорієнтації і розміру зерна. Спостерігаються два режими руйнування: транскристалічне та міжкристалічне при різних значеннях RTS. Оптимальні параметри обробки визначаються за допомогою алгоритму імітаційного відпалу. Експерименти з різанням, проведені за оптимальними параметрами, призводять до поверхні з шорсткістю Sa 1,314 нм. Розроблена модель і нові результати є корисними для точного прогнозування шорсткості поверхні полікристалічних матеріалів та розуміння механізму впливу дефектів матеріалу при алмазному точінні.

У статті [58] були розроблені моделі прогнозування для токарних операцій з використанням методів м'яких обчислень, таких як регресія опорних векторів (SVR) та штучна нейронна мережа (ANN). Було проведено низку експериментів з точіння для отримання реальних даних. Розроблені моделі прогнозування шорсткості поверхні порівнювались за допомогою відносної помилки та перевірялися за допомогою тестів гіпотез. Результати показали, що обидва методи забезпечують тісний зв'язок між прогнозованими та експериментальними значеннями шорсткості поверхні та підходять для прогнозування з прийнятною точністю. Встановлено, що ANN працює краще порівняно з SVR.

У роботі [59] розглянуто прогноз шорсткості для 3D-друку з використанням моделювання методом пошарового наплавлення (FDM). Важко

заздалегідь передбачити, яке саме оздоблення поверхні буде досягнуте при заданих значеннях параметрів. Метою цієї роботи було порівняння моделей, створених за допомогою алгоритмів дерева рішень (C4.5, випадковий ліс і випадкове дерево), та аналіз того, яка з них дає найкращий прогноз шорсткості поверхні деталей з поліетилентерефталат-гліколю (PETG), надрукованих за допомогою техніки FDM. Моделі були створені на основі набору даних із 27 зразків з наступними атрибутами: висота шару, температура екструзії, швидкість друку, прискорення друку і швидкість потоку. Також був створений набір даних для оцінки моделей, що складається з 15 додаткових зразків. Моделі, створені за допомогою алгоритму випадкового дерева, досягли найкращих результатів для прогнозування шорсткості поверхні деталей FDM.

Дослідження [60] присвячене моделюванню та прогнозуванню шорсткості обробленої поверхні на основі вхідних характеристик, включаючи оптимальну швидкість, подачу та глибину різання. Використовувались моделі машинного навчання на основі реального набору даних, зібраного в лабораторії. Обговорюються процес та результати моделювання. Показано, що нейронна мережа може досягти кращої якості та ефективності прогнозування порівняно з іншими базовими моделями.

У роботі [61] досліджується репрезентативний дефект шорсткості під час токарної обробки, який вибрано як ключовий об'єкт управління типовим процесом з'єднання. На основі традиційної теорії прогнозування шорсткості, що базується на детермінованих параметрах процесу, була розроблена модель прогнозування шорсткості, яка всебічно враховує фактор випадкових вібрацій процесу токарної обробки. Відповідні отримані дані з токарної обробки були використані для аналізу та дослідження. Згідно з результатами, вибрані вхідні параметри та прогнозована шорсткість поверхні знаходяться в хорошій відповідності. Показано, що на шорсткість поверхні впливають такі фактори, як подача, стан інструменту та вібрація. З цього можна прогнозувати шорсткість поверхні, обробленої в процесі роботи, в реальному часі шляхом обробки отриманих сигналів вібрації.

Представлені дві основні методики – RSM та Метод Тагучі – є способами організації експериментальної процедури та необхідної обробки даних. При цьому RSM фактично є процедурою формулювання моделі, яка дозволяє досліджувати, як важливі фактори впливають на результат експерименту, та приводить до розробки поліноміальних моделей першого і другого порядку, що включають розглянуті параметри та їх статистичну значущість. Поліноміальні функції прості, дозволяють швидко й наочно отримати висновки та в більшості випадків забезпечують високу достовірність результатів.

З іншого боку, Тагучі DoE – це швидше процедура факторного скринінгу для визначення значущості кожного фактора, тобто вона визначає найбільш впливові параметри та значення, що дають бажаний результат, без формулювання моделі.

Слід зазначити, що через їх загальність і сильну статистичну базу деякі завдання цих методологій можуть бути ізольовані та застосовані до широкого кола інженерних задач, де розмір простору пошуку має бути зменшений.

3.4 Методи, що використовуються в сукупності з концепцією Тагучі

3.4.1 Техніка переваги порядку за схожістю з ідеальним рішенням (TOPSIS)

Метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) широко використовується як методологія прийняття рішень за кількома атрибутами (MADM), як зазначено в роботі [3.44]. Основна ідея методу полягає в тому, що вибране альтернативне рішення має бути на мінімальній відстані від позитивного ідеального рішення і на максимально можливій відстані від негативного ідеального (антиідеального) рішення. Позитивне ідеальне рішення – це таке, яке максимізує критерії якості (вигоди) та мінімізує критерії витрат. Негативне ідеальне рішення максимізує критерії витрат і мінімізує критерії вигоди. У принципі, квадратична функція втрат Тагучі та крива байдужості в методі TOPSIS мають схожі характеристики. Метод Тагучі вирішує одновимірну задачу, тоді як метод TOPSIS орієнтований на вирішення багатовимірних задач. В результаті, відносна близькість, яка обчислюється в TOPSIS, може використовуватися як показник вимірювання ефективності для оптимізації задач з кількома відповідями в методі Тагучі.

Загальний алгоритм методу TOPSIS включає наступні етапи:

1. На цьому етапі визначається матриця початкового прийняття рішень. Кожен рядок цієї матриці представляє одну альтернативу, а кожен стовпець відповідає значенню атрибута для різних альтернатив. Матрицю прийняття рішень можна подати у вигляді

$$D = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11}x_{12}\dots x_{1j}\dots x_{1n} \\ x_{21}x_{22}\dots x_{2j}\dots x_{2n} \\ \dots\dots\dots \\ x_{i1}x_{i2}\dots x_{ij}\dots x_{in} \\ \dots\dots\dots \\ x_{m1}x_{m2}\dots x_{mj}\dots x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

де A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) представляє можливі альтернативи; X_j ($j = 1, 2, \dots, n$) представляє атрибути, що належать до альтернативних характеристик; x_{ij} – характеристики A_i стосовно атрибуту X_j .

2. На другому етапі отримують нормалізовану матрицю рішень r_{ij} шляхом перетворення виду

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}},$$

де r_{ij} представляє нормалізоване уявлення A_i стосовно атрибуту X_j .

3. На цьому етапі необхідно отримати зважену нормалізовану матрицю рішень $\bar{V} = |v_{ij}|$, як $V = w_j r_{ij}$ де $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

4. На четвертому етапі визначають позитивне ідеальне (найкраще) і негативне ідеальне (найгірше) рішення, які можна представити у вигляді:

позитивне ідеальне рішення:

$$A^+ = \left\{ \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J^+ \mid i = 1, 2, \dots, m \right) \right\} = \left\{ v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+ \right\},$$

негативне ідеальне рішення:

$$A^- = \left\{ \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J^- \mid i = 1, 2, \dots, m \right) \right\} = \left\{ v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^- \right\},$$

де $J^+ = \{j = 1, 2, \dots, n \mid j\}$ пов'язано з корисними властивостями (атрибути), $J^- = \{j = 1, 2, \dots, n \mid j\}$ пов'язано з невідгідними (несприятливими) властивостями (атрибути).

5. На цьому етапі визначаються відстані та обчислюється відстань альтернативи від ідеалу. Рішення визначається n -вимірною евклідовою відстанню з наступних рівнянь

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)}, i = 1, 2, \dots, m.$$

6. На шостому етапі розраховується відносна близькість — коефіцієнт близькості (closeness coefficient, CC) до ідеального рішення, який можна обчислити за допомогою такої формули:

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, i=1, 2, \dots, m; 0 \leq C_i^+ \leq 1$$

7. На цьому етапі здійснюється ранжування порядку переваг. Альтернатива з найбільшою відносною близькістю є найкращим вибором.

У більшості досліджень і роботах C_i^+ для кожного експериментального набору використовується індекс мультипродуктивних характеристик (MPCI), який оптимізується за допомогою методу Тагучі.

3.4.2 Метод головних компонент (РСА)

У цьому методі, перш за все, вихідна послідовність даних піддається попередній обробці. Метод головних компонент (РСА) — це багатовимірний статистичний підхід, який дозволяє перевести вихідну базу даних у нову систему даних. Ця система характеризується новими змінними, які називаються головними компонентами (РС). Кожна головна компонента має властивість максимально пояснювати варіацію (дисперсію), що спостерігається у вихідному наборі даних. Головні компоненти, виражені як лінійні комбінації вихідних змінних, ортогональні між собою та можуть бути використані для ефективного представлення досліджуваної системи. При цьому менша кількість змінних у новій системі називається балами, а коефіцієнт лінійної комбінації описує кожну головну компоненту, тобто вагу вихідних змінних для кожної головної компоненти. Для запобігання впливу елементів, що використовуються для оцінки, на оптимізацію процесу обробки необхідна нормалізація даних, щоб забезпечити правильну інформацію для визначення оптимальних рівнів параметрів процесу. Нормалізація здійснюється шляхом таких перетворень:

- для випадку нижній показник (Lower-the-Better) краще

$$\hat{x}_i(k) = \frac{\max_k x_i(k) - x_i(k)}{[\max_k x_i(k)] - \min_k x_i(k)}, \quad (3.8)$$

- для випадку верхній показник (Higher-the-Better) краще

$$\hat{x}_i(k) = \frac{x_i(k) - \min_k x_i(k)}{[\max_k x_i(k)] - \min_k x_i(k)}, \quad (3.9)$$

де $\hat{x}_i(k)$ значення після нормалізації характеристики якості; $x_i(k)$ – експериментальні дані характеристики якості k_{th} під час i_{th} експерименту. Отримані дані можуть містити ряд змінних, і між ними може бути певна надмірність (кореляція). Щоб усунути таку кореляцію, можна звести набір спостережуваних змінних до меншого набору нових змінних, які називаються головними компонентами. Аналіз головних компонент дозволяє зменшити розмірність даних шляхом виконання коваріаційного/кореляційного аналізу між факторами та лінійною комбінацією оптимально зважених спостережуваних змінних. Факторний аналіз використовується для узагальнення структури даних за кількома вимірами, а також для пояснення вимірів, пов'язаних з великою змінністю даних.

По суті, метод головних компонент (PCA) — це спосіб виявлення закономірностей у корельованих даних і вираження їх таким чином, щоб підкреслити їх подібності та відмінності/неоднорідність. Основна перевага PCA полягає в тому, що після виявлення закономірностей у даних їх можна стиснути за допомогою зменшення кількості вимірів без значних втрат інформації. PCA є ефективним статистичним методом для дослідження багатьох якісних характеристик, що сильно корелюють. Цей метод дозволяє перетворити дані, що містять інформацію про різні характеристики, в кілька незалежних показників якості. Частина цих показників потім відбирається для побудови складного показника якості, який є представником множинних показників якості.

Реалізація методів PCA складається з декількох етапів:

- *отримання даних* – необхідно зібрати і підготувати вихідні дані для аналізу. Це може бути великий набір спостережень, що включає різні змінні, які потребують подальшого аналізу;
- *нормалізація даних* – змінні наділяють однаковою вагою в подальшому аналізі. Це здійснюється шляхом стандартизації кожної змінної до середнього значення 0 та стандартного відхилення 1;
- *розрахунок коваріаційної/кореляційної матриці* - аналізуються кореляції між змінними, щоб зрозуміти, як вони взаємопов'язані. Коваріаційна матриця дозволяє оцінити, наскільки зміни однієї змінної пов'язані з іншими;
- *інтерпретація коваріаційної/кореляційної матриці* – здійснення аналізу матриці, з метою виділення найважливіших компонентів, які найбільше

впливають на розподіл даних. Це допомагає визначити, які компоненти мають найбільший внесок у варіативність даних.

Після цього нормалізовані дані використовуються для побудови дисперсійно-коваріаційної матриці M наступним способом (3.10)

$$M = \begin{bmatrix} N_{1,1} & N_{1,2} & \dots & N_{1,p} \\ N_{2,1} & N_{2,2} & \dots & N_{2,p} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ N_{q,1} & N_{q,2} & \dots & N_{q,p} \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

де $N_{k,l} = \frac{Cov(Y_{i,k}^*, Y_{i,l}^*)}{\sqrt{Var(Y_{i,k}^*)Var(Y_{i,l}^*)}}$, у якому q означає кількість показників якості,

а p – кількість експериментальних серій. Потім обчислюються власні вектори та власні значення матриці M , які позначаються $\bar{V}_j$ і $\bar{\lambda}_j$ відповідно. У РСА власний вектор $\bar{V}_j$ являє собою ваговий коефіцієнт j числа характеристик якості j -ї головної компоненти. Наприклад, якщо Q_j представляє j -ю характеристику якості, j -й головний компонент ψ_j можна розглядати як показник якості з необхідною характеристикою

$$\psi_j = V_{1j}Q_1 + V_{2j}Q_2 + \dots + V_{jj}Q_j = \bar{V}_j \bar{Q}_j.$$

Необхідно зазначити, що кожна головна компонента представляє собою певну міру пояснення варіації якісних характеристик, а саме частку відповідальності (АР). Накопичення кількох головних компонент збільшує частку відповідальності якісних характеристик. Це позначається як сукупна частка відповідальності (САР). Складова головна компонента ψ_j може бути визначена як сума/лінійна комбінація головних компонент із їх індивідуальними власними значеннями. Таким чином, складова головна компонента ψ є загальним показником якості у вигляді (3.11)

$$\Psi = \sum_{j=1}^k \psi_j. \quad (3.11)$$

Якщо характеристика якості Q_j сильно домінує в j -й головній компоненті, то ця головна компонента стає основним показником характеристики якості. Необхідно зазначити, що один показник якості часто може відображати всі різноякісні характеристики. Вибір окремих головних компонентів ψ_j , які будуть включені до складного показника якості, залежить від їх індивідуальної частки відповідальності.

3.4.3 Теорія корисності (Utility Theory - UT)

При проектуванні виробу або процесу завжди існує кілька реакцій якості (або вихідних характеристик), і часто потрібно вибрати оптимальну комбінацію параметрів для цих реакцій одночасно. Метод Тагучі, як економічно ефективний метод автономного контролю якості, широко використовується в інженерії для вирішення завдань з одним параметром, але не може вирішити задачу багатокритеріальної оптимізації. Для подолання цієї проблеми дослідники вперше застосували теорію корисності (UT) [63] у поєднанні з методом Тагучі. Методологічною основою підходу UT є перетворення очікуваного відгуку кожної характеристики якості в загальний показник. Це міра ефективності атрибута (або якісних характеристик), що оцінює простір результатів. Спільну функцію корисності можна виразити у вигляді (3.12)

$$U(X_1, X_2, \dots, X_n) = f(U_1(X_1), U_2(X_2), \dots, U_n(X_n)). \quad (3.12)$$

Загальна функція корисності є сумою окремих корисностей, якщо атрибути незалежні, і може бути представлена у вигляді (3.13)

$$U(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{i=1}^n U_i(X_i). \quad (3.14)$$

Загальна функція корисності після присвоєння ваг атрибутам може бути виражена у вигляді (3.14)

$$U(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{i=1}^n W_i \otimes U_i(X_i). \quad (3.14)$$

Кількість переваг виражається в логарифмічних координатах таким чином (3.15)

$$P_i = A \times \log \left(\frac{X_i}{X_i'} \right), \quad (3.15)$$

де X_i – значення будь-якої якісної характеристики або атрибуту i ; X_i' це просто прийнятне значення характеристики якості чи атрибуту i ; A – константа. Значення A можна знайти з умови, якщо $X_i = X^*$ (де X^* оптимальне чи найкраще значення), тоді $P_i = 9$. Отже,

$$A = \frac{9}{\log \left(\frac{X^*}{X_i'} \right)}.$$

Загальна корисність може бути виражена як

$$U = \sum_{i=1}^n W_i \otimes P_i.$$

За умови

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1.$$

Загальний індекс корисності зазвичай служить єдиною цільовою функцією для оптимізації. Серед різних типів якісних характеристик, а саме згідно з функціями корисності «менше-краще» (LB), «вище-краще» (NB) і «номінальне-краще» (NB), функція корисності буде типу «вище-краще». Тому, якщо функція якості максимізована, то якісні характеристики, що розглядаються для її оцінки, будуть автоматично оптимізовані (максимізовані або мінімізовані залежно від обставин).

3.4.4 Функція бажаності (Desirability Function)

У підході функції бажаності (DF) окремі відгуки або відповіді перетворюються в відповідні значення бажаності. Ці величини залежать від обраного діапазону допуску, а також від мети реагування. Одиниця присвоюється, коли відгук досягає цільового значення, яке є найбільш бажаною

ситуацією. Якщо значення відповіді виходить за межі встановленого діапазону допуску, що є небажаним, то його значення бажаності приймається рівним нулю. Таким чином, значення бажаності може змінюватися від нуля до одиниці. Зазвичай розрізняють три типи бажаності: чим вище, тим краще (НВ); чим менше, тим краще (ЛВ); номінально «краще» (NB).

Перший тип бажаності — чим вище, тим краще (НВ). Функція бажаності зображена на рис. 3.4, а. Коли значення $\hat{y}$ перевищує певне значення критерію, відповідно до вимог бажаної величини, то воно приймається рівним 1. Якщо ж це не так, тобто значення $\hat{y}$ менше певного порогового значення, то функція бажаності дорівнює 0. Функції бажаності для критерію «вище-тем-краще» (НВ) записуються у формі даної рівняннями (3.16), де $y_{\min}$ позначає нижню межу допуску, $\hat{y}$, а $y_{\max}$ — верхню межу функції $\hat{y}$. Значення r є індексом функції бажаності, який має бути визначений особою, що приймає рішення.

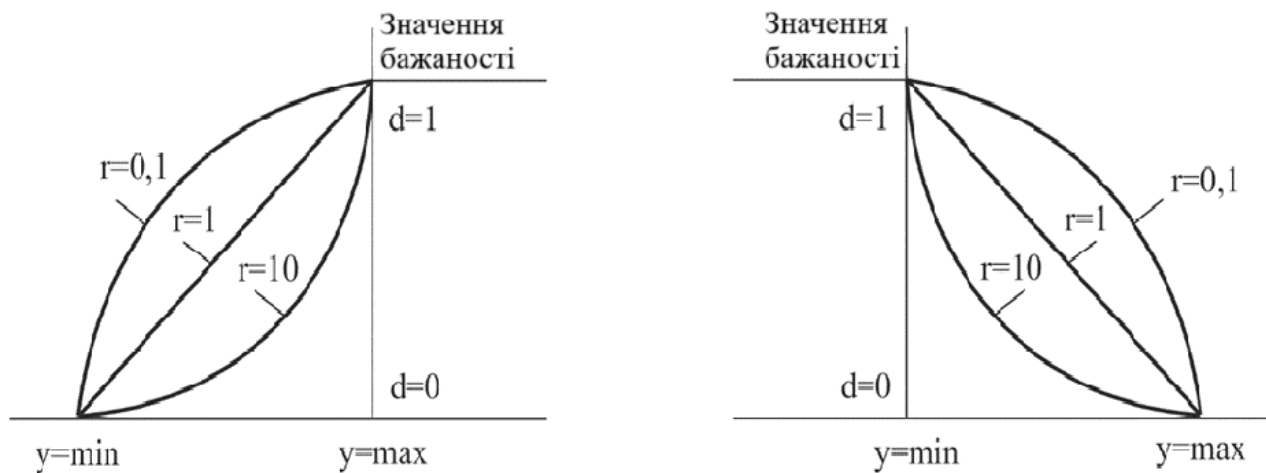


Рисунок 3.4 – Функція бажаності: а – що вище, то краще «НВ»;
б) що менше, то краще «ЛВ»

$$\hat{y} \leq y_{\min}, d_i = 0, \quad y_{\min} \leq \hat{y} \leq y_{\max}, d_i = \left(\frac{\hat{y} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \right)^r, \quad \hat{y} \geq y_{\max}, d_i = 1. \quad (3.16)$$

Другий тип бажаності — чим менше, тим краще (ЛВ). Функція бажаності, показана на рис. 3.4, б. Коли значення $\hat{y}$ відповідає вимогам і є меншим за певне значення критерію бажаної величини d_i , то функція бажаності приймає значення 1. Якщо це не так, тобто значення $\hat{y}$ перевищує певний поріг, то функція бажаності дорівнює 0. Функції бажаності для критерію «чим менше, тим краще» (ЛВ) записуються у вигляді рівнянь (3.17), де $y_{\min}$ позначає нижню межу

допуску $\hat{y}$, а $y_{\max}$ – верхню межу функції $\hat{y}$. Значення r є індексом функції бажаності, який має бути визначений особою, що приймає рішення.

$$\hat{y} \leq y_{\min}, d_i = 1, y_{\min} \leq \hat{y} \leq y_{\max}, d_i = \left(\frac{\hat{y} - y_{\max}}{y_{\min} - y_{\max}} \right)^r, \hat{y} \geq y_{\max}, d_i = 0. \quad (3.17)$$

Критерій «номінально найкраще» (NB). Значення $\hat{y}$ необхідні для досягнення конкретної мети T , як показано на рис. 3.5. Коли значення $\hat{y}$ відповідає T , значення бажаності дорівнює 1. Якщо відхилення перевищує певний діапазон від мети, значення бажаності дорівнює 0, що вказує на найгірший випадок. Функцію бажаності для критерію «номінально краще» (NB) можна записати, як зазначено в рівнянні (3.18).

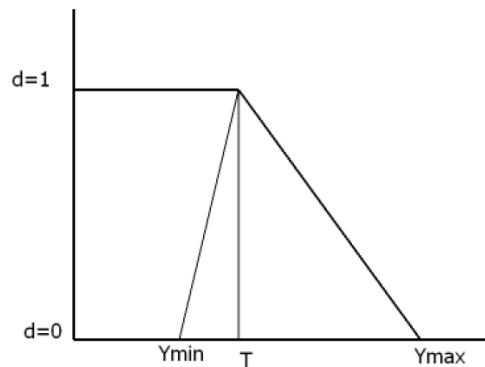


Рисунок 3.5 – Функція бажаності (номінально найкраще)

$$y_{\min} \leq \hat{y} \leq T, d_i = \left(\frac{\hat{y} - y_{\min}}{T - y_{\min}} \right)^r, T \leq \hat{y} \leq y_{\max}, d_i = \left(\frac{\hat{y} - y_{\max}}{T - y_{\max}} \right)^r. \quad (3.18)$$

Тут $y_{\max}$ і $y_{\min}$ представляють верхні/нижні межі допуску $\hat{y}$, а коефіцієнт r являє собою індекс функції бажаності.

Індивідуальні бажаності підсумовуються для розрахунку загального значення бажаності D_0 даної характеристики якості з використанням рівняння (3.19), де d_i значення кожної i -ої величини якості, n – загальна кількість відповідей (відгуків). Значення w_i ваги для i -го атрибуту якості. Сума ваг усіх атрибутів повинна дорівнювати 1.

$$D_0 = \left(d_1^{w_1}, d_2^{w_2}, \dots, d_n^{w_n} \right)^{1/\sum w_i} \quad (3.19)$$

3.4.5 Системи нечіткої логіки (FIS) та адаптивна система нейро-нечіткої логіки (ANFIS)

Нечітка логіка (FIS) — це математична теорія нечітких міркувань, яка дозволяє моделювати процес людського мислення у лінгвістичних засобах, визначаючи взаємозв'язок між вхідними даними системи та бажаними вихідними результатами. Нечітке управління та нечіткі міркування знайшли конкретне застосування в складних промислових системах, які неможливо точно змоделювати навіть за різних припущень і апроксимацій. Система, побудована на нечітких правилах, складається з чотирьох частин:

1. Модуль фазифікації, який перетворює вхідні дані системи, що представляють собою чіткі числа, у нечіткі множини. Це здійснюється за допомогою функції фазифікації.
2. База знань, в якій зберігаються правила IF-THEN, надані експертами.
3. Механізм виведення, що імітує процес людського міркування, роблячи нечіткі висновки на основі вхідних даних і правил IF-THEN.
4. Модуль дефазифікації, який перетворює нечітке множина, отримане механізмом виведення, у чіткі значення вихідних даних.

Нечіткі значення визначаються функціями належності, які визначають ступінь належності об'єкта до нечіткої множини [64]. Проте досі не існує стандартного методу вибору функцій належності нечіткого множини керуючих змінних. Зазвичай застосовуються методи проб і помилок.

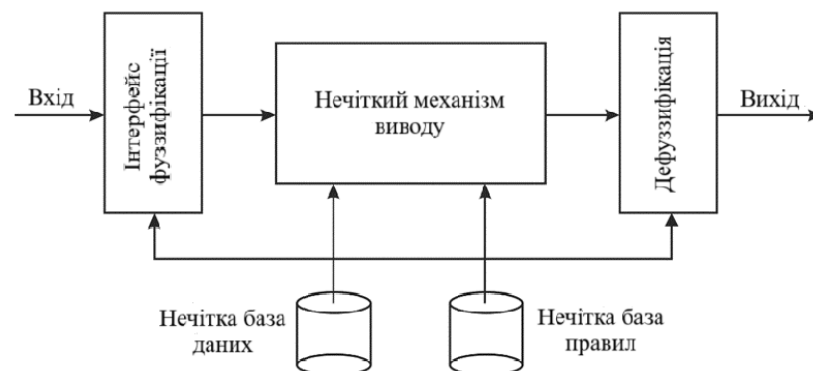


Рисунок 3.6 – Базова конфігурація системи нечіткого виводу (FIS)

Адаптивна нейро-нечітка система виведення ANFIS є системою нечіткої логіки, реалізованою в рамках адаптивної нейронної мережі. Використовуючи гібридну процедуру навчання, ANFIS може побудувати відображення між входом і виходом на основі як людських знань у вигляді нечітких правил «if-

then», так і заданих пар вхідних та вихідних даних для навчання нейронних мереж. Архітектура ANFIS показана на рисунку 3.6. ANFIS використовує п'ять рівнів мережі для виконання наступних кроків нечіткого виведення:

- фазифікація вхідних даних;
- побудова бази даних нечіткого множини;
- побудова нечіткої бази правил;
- прийняття рішення;
- дефазифікація виходу.

Фаза навчання або тренування нейронної мережі являє собою процес визначення значень параметрів для достатнього подання навчальних даних. Основним методом навчання є метод зворотного поширення помилки (BP), в якому мінімізуються помилки, зазвичай що є сумою квадратів різниць між вихідними даними мережі та бажаними вихідними даними. Ефективність моделі перевіряється за допомогою окремих тестових даних, і на етапі тестування очікується відносно хороше відображення. Згідно з [66], система нечіткої логіки TSK 1-го рівня базується на двох правилах [65].

Варто зазначити, що ANFIS є потужнішим методом, ніж простий алгоритм нечіткої логіки та нейронні мережі. Це метод нечіткого моделювання для вивчення інформації про набір даних, щоб обчислити параметри функції належності, які найкраще дозволяють здійснити відповідний нечіткий висновок для відстеження заданих вхідних/вихідних даних. З архітектури ANFIS (рис. 3.7) видно, що при заданих значеннях параметрів загальна вихідна функція може бути виражена як лінійна комбінація наступних параметрів. На основі цього спостереження використовується гібридне правило навчання, яке поєднує метод градієнтного спуску та метод найменших квадратів для визначення можливих антецедентних та наступних параметрів [67, 68].

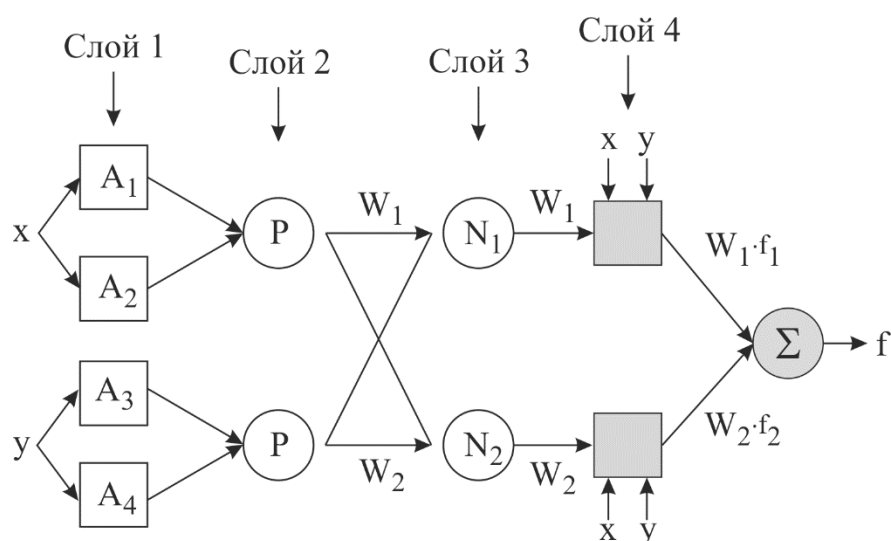


Рисунок 3.7 – Архітектура ANFIS

Онлайн-ідентифікація характерної ознаки в ANFIS починається з отримання набору даних (пар вхідних і вихідних даних) і поділу його на навчальні та перевірочні набори даних. Набір навчальних даних використовується для пошуку початкових параметрів припущення для нечіткого належності функції, рівномірно розподіляючи кожну функцію належності. Значення вихідних параметрів фіксовані, тому загальна розглядана характеристика, яка прогнозується в режимі онлайн, може бути виражена як лінійна комбінація послідовних параметрів.

Нечітка модель Сугено, прийнята в [69], описує архітектуру ANFIS та її алгоритм навчання. Система нечіткого виведення має два входи m і n та один вихід f . Для нечіткої моделі першого порядку типовий набір правил з двома нечіткими IF-THEN може бути виражений наступним чином:

Правило 1

$$\text{if } (m \text{ is } A_1) \text{ and } (n \text{ is } B_1) \text{ then } f_1 = p_1 m + q_1 n + r_1$$

Правило 2

$$\text{if } (m \text{ is } A_2) \text{ and } (n \text{ is } B_2) \text{ then } f_2 = p_2 m + q_2 n + r_2$$

де p_1, p_2, q_1, q_2, r_1 та r_2 – лінійні параметри, а A_1, A_2, B_1 та B_2 – нелінійні параметри.

Відповідна еквівалентна архітектура ANFIS показана на рис. 3.7. Вся архітектура системи складається з п'яти рівнів, а саме: нечіткого рівня, рівня продукту, нормалізованого шару, нечіткого шару та рівня загального виведення.

Рівень 1 є нечітким шаром, в якому m та n є вхідними даними вузлів A_1, A_2, B_1, B_2 . Це лінгвістичні мітки, що використовуються в нечіткій теорії для поділу функцій належності. Відношення належності між вихідними та вхідними функціями цього шару можна виразити як (3.20), (3.21):

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(m) (i = 1, 2), \quad (3.20)$$

$$O_{1,j} = \mu_{B_j}(n) (j = 1, 2), \quad (3.21)$$

де $O_{1,i}$ і $O_{1,j}$ позначають вихідні функції, а μ_{A_i} й μ_{B_j} позначають функції приналежності.

Рівень 2 це шар, що складається з двох вузлів, позначених як P . Вихідні дані w_1 й w_2 є ваговими функціями наступного шару. Вихід цього шару є добутком вхідного сигналу, що визначається наступним як

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{Ai}(m) \cdot \mu_{Bi}(n) \quad (i=1,2), \quad (3.22)$$

де $O_{2,i}$ означає вихід другого шару.

Третій рівень це нормалізований шар, вузли якого позначені як N . Його функція нормалізувати вагову функцію, використовуючи наступний процес

$$O_{3,i} = \bar{w} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (i=1,2), \quad (3.23)$$

де $O_{3,i}$ означає вихід третього шару.

Четвертий рівень – це шар дифузії, вузли якого є адаптивними. В цьому шарі функції належності та параметри налаштовуються на основі навчання, що дозволяє системі адаптуватися до нових даних. Адаптивні вузли мають здатність змінювати свої значення в процесі навчання, що сприяє покращенню результатів нечіткого виведення. Вихідне рівняння має вигляд $\bar{w}(pm + qn + r)$, де p_i, q_i, r_i позначають лінійні параметри чи так звані послідовні параметри вузла. Нечіткий зв'язок між входом та виходом цього шару можна визначити як

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i m + q_i n + r_i) \quad (i=1,2), \quad (3.24)$$

де $O_{4,i}$ означає вихід четвертого шару.

П'ятий рівень – це загальний вихідний шар, вузол якого позначений як Σ . Вихід цього шару є сумою вхідних сигналів, що відображає результат виявлення стану інструменту (нормальний чи несправний). Результати можна записати як (3.25)

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (i=1,2). \quad (3.25)$$

3.5 Підхід штучного інтелекту та м'які обчислення

Штучний інтелект реалізується в інженерних задачах через розробку моделей штучних нейронних мереж, генетичних алгоритмів (ГА), нечіткої логіки та експертних систем. Особливу значущість здобула методологія м'яких обчислень. Унікальною властивістю м'яких обчислень є аналіз і оцінка експериментальних даних. Це, насамперед, їх узагальнення або інтерполяція для отримання вихідних даних з попередньо невідомих вхідних, із використанням результатів з попередніх вивчених входів. Узагальнення зазвичай здійснюється в багатовимірному просторі.

3.5.1 Огляд штучних нейронних мереж

Нейронні мережі — це системи, які здатні отримувати, зберігати та використовувати знання, отримані на основі досвіду [70]. Штучна нейронна мережа (ШНМ) здатна навчатися, аналізуючи експериментальний набір даних для опису нелінійних ефектів та ефектів взаємодії. Цей процес складається з вхідного рівня, що використовується для введення даних в мережу, вихідного рівня для отримання відповіді ШНМ і одного або кількох прихованих шарів (активностей), розташованих між ними. Вхідний та вихідний шари відображають вплив навколишнього середовища, тоді як приховані шари не контактують з середовищем. Кожна ШНМ має свою топологію, вектори ваг та функцію активації, які використовуються в прихованих і вихідних рівнях мережі. Нейронну мережу спочатку навчають на основі ряду даних, після чого тестують на іншому наборі даних. Це дозволяє отримати оптимальну топологію та вагові коефіцієнти. Після навчання нейронні мережі можна використовувати для обчислень і прогнозування.

Багатошаровий персептрон (MLP) — це нейронна мережа з прямим зв'язком, що включає один або кілька прихованих шарів. Нейронна мережа з прямим зв'язком має послідовність шарів, кожен з яких містить певну кількість нейронів. Вихід одного шару стає входом для нейронів наступного шару.

Нейронна мережа з радіальною базисною функцією (RBF) складається з трьох шарів: вхідного шару, прихованого шару з нейронами для нелінійної обробки і вихідного шару. У процесі навчання мережа коригує коефіцієнти ваги, щоб мінімізувати помилки між очікуваними і бажаними результатами. Алгоритм зворотного поширення є найбільш поширеним алгоритмом для коригування коефіцієнтів ваги.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) або нейронні обчислення є однією з найшвидше розвиваються сфер досліджень [71]. Використання ШНМ приваблює

дослідників з широкого спектра застосувань, зокрема в механічній обробці матеріалів. ШНМ найкраще налаштовуються для таких застосувань, як розпізнавання образів, розпізнавання даних, обробка зображень, прогнозування фондового ринку, прогноз погоди, стиснення зображень, а також програми безпеки і кредитування.

Нейронні мережі в основі своїй ґрунтуються на можливості наблизити традиційні комп'ютери до роботи людського мозку. ШНМ працюють краще, якщо відношення між входами і виходами є дуже нелінійним. ШНМ дуже зручні для вирішення проблем, де немає алгоритмів або певного набору правил, яких слід дотримуватися для вирішення проблеми.

Принцип роботи полягає в тому, що кожен нейрон виконує певні операції, а загальна операція являє собою зважену суму цих операцій. Навчання нейронної мережі має на меті навчити її так, щоб відомий набір входів давав бажані результати.

Навчання здійснюється шляхом подачі шаблонів навчання в мережу і дозволу мережі змінювати свої коефіцієнти ваги відповідно до деяких заздалегідь визначених правил навчання. Навчання може бути як під наглядом, так і без нагляду. Під наглядом навчання мережі надаються вхідні дані, і вони повинні відповідати заданим шаблонам, тобто результати відомі для конкретних вхідних даних. При навчанні без нагляду мережа вчиться реагувати на шаблони введення без попередньо визначених результатів.

Штучна нейронна мережа (ШНМ) за своєю суттю є математичною моделлю, що імітує людське мислення, і базується на таких припущеннях [71]:

- обробка інформації відбувається в ряді простих елементів, що називаються нейронами;
- сигнали передаються між нейронами через канали зв'язку;
- кожному каналу зв'язку присвоєний ваговий коефіцієнт, який множить передаваний сигнал;
- кожен нейрон застосовує функцію активації до вхідного сигналу для визначення свого вихідного сигналу.

Двома основними характеристиками ШНМ є:

- схема розташування нейронів, а саме архітектура мережі, яка зазвичай визначає, який тип задач може бути вирішено;
- метод визначення ваг зв'язків, або за допомогою алгоритму навчання, що узагальнює відношення між вхідними та вихідними векторами-шаблонами (навчання з учителем), або за допомогою виведення класифікацій, властивих даним, і генерування векторів-шаблонів для кожного створюваного класу (навчання без учителя).

Найбільш поширеним типом ШНМ, що використовувалися в досліджуваних літературі, є ШНМ прямого поширення, навчені з деякими варіаціями алгоритму зворотного поширення помилки. Типову архітектуру цих ШНМ можна побачити на рис. 3.7. Нейрони розташовані шарами, а саме: вхідний шар, прихований шар і вихідний шар, зліва направо. Вхідний шар використовується для подання даних в ШНМ, а вихідний — для формування відповіді ШНМ.

Переваги та недоліки нейронних мереж:

- ШНМ не є універсальним інструментом для вирішення проблем, оскільки не існує універсальної методології навчання та перевірки ШНМ;
- результат роботи ШНМ залежить від точності доступних даних;
- ШНМ можуть працювати з неповними наборами даних;
- ШНМ найбільш корисні в програмах прогнозування та передбачення.

3.5.2 Нечітка логіка та нейро-нечіткі системи

Нечітка логіка базується на концепції нечітких множин. Нечітка множина — це набір без чітко визначеної межі, тобто може включати елементи з частковим ступенем належності (зазвичай у діапазоні від 0 до 1).

Ідея нечітких множин була вперше запропонована Лотфі Заде [72], який припустив, що елементи певного набору можуть мати часткове членство. Багато лінгвістичних термінів можна перетворити на нечіткі множини. Наприклад, термін «*низька подача*» може бути представлений як нечітка множина, у якій значення, що перевищують верхню межу, мають ступінь належності 1, а ті, що нижчі за нижню межу, — 0. Між цими межами значення змінюють ступінь належності від 0 до 1. Коли лінгвістичні змінні перетворюються на нечіткі множини, до них можна застосовувати теоретико-множинні операції. Таким чином, *теорія нечітких множин* є інструментом для «обчислень за допомогою мови». Методи, які базуються на нечітких множинах, є ефективними для перетворення суб'єктивних знань або думок досвідченого експерта в математичну основу [73].

Нечіткий підхід [74] є технікою м'яких обчислень. В нечіткій логіці один із методів ґрунтується на описі функції належності, яка представляє масштаб кожного регіону. Нечітка множина може реалізовувати справжню нечітку логіку, якщо вона використовується для зміни значень членства. Цей підхід є швидким, проте його продуктивність інколи недостатня. Для такого методу застосовуються *правила «if-then» (якщо-то)*. Нечітке правило IF-THEN дозволяє розпізнавати контури, а також враховувати околиці центрального пікселя у вхідному зображенні, де пікселі розподіляються за нечіткими множинами. У

цьому підході однорідність оцінюється для перевірки схожості двох регіонів під час сегментації.

У літературі зазвичай виділяють три основні типи застосування теорії нечітких множин:

1. Операції теорії нечітких множин для прийняття рішень

У застосуваннях першого типу використовуються нечіткі операції для визначення оптимальних рішень. Наприклад, якщо відомі ступені належності певних рішень для двох конфліктуючих цілей, то оптимальним буде вибір, який забезпечує максимальний ступінь належності в перетині цих двох множин. Такий підхід допомагає інтегрувати компромісні варіанти у складних завданнях оптимізації.

2. Нечітка арифметика

У другому типі застосувань використовується нечітка арифметика, яка працює з нечіткими числами. *Нечітке число* – це узагальнення числового інтервалу, в якому різні значення мають різні ступені належності. Наприклад, найімовірніша оцінка коефіцієнта тертя може мати ступінь належності 1, а верхня та нижня межі інтервалу – 0,5. На основі цих даних будується трикутник, який описує тертя як нечітке число. Нечітка арифметика корисна у випадках, коли параметри, такі як коефіцієнт тертя або властивості матеріалів, точно невідомі.

3. Висновки на основі нечіткої логіки

У третьому типі застосувань нечітка логіка використовується для формування висновків на основі вхідних даних. Система прогнозування на основі нечіткої множини виконує «*fuzzification*» (*нечітке перетворення*), під час якого вхідні дані переводяться у лінгвістичні терміни, такі як "низька подача", "середня швидкість різання", "велика глибина різання", "дуже високі зусилля різання", тощо. Ці терміни передаються механізму висновку, який використовує заздалегідь визначені правила IF-THEN. Результати висновку у лінгвістичній формі проходять через процес «*defuzzification*» (*зворотне нечітке перетворення*), що переводить їх у числову форму.

Більш формальне визначення нечіткої множини M у множині X полягає в тому, що вона є функцією від множини X до одиничного інтервалу, тобто $M: X \rightarrow [0,1]$. Функція, яка визначає, як кожен елемент відображається на ступінь належності, називається *функцією належності* (Membership Function, MF).

Правила "If-then" використовуються для формулювання «логіки» шляхом створення тверджень, які містять знання. Типова форма такого правила виглядає так: *If x це A then y це B*, де x називається антецедентом (умовою), y – консеквентом (висновком), а A та B – лінгвістичні значення, визначені нечіткими множинами. Результати всіх активних правил об'єднуються в одну нечітку

множину, яка згодом проходить процес *дефазифікації* для отримання конкретного числового значення.

У нейро-нечітких системах штучні нейронні мережі (Artificial Neural Networks, ANN) застосовуються для визначення параметрів нечітких систем, автоматично створюючи або покращуючи їх. Реалізація таких систем може бути організована двома способами:

- *кооперативна нейро-нечітка система* – ANN і нечітка система працюють незалежно одна від одної, співпрацюючи для досягнення спільної мети;
- *гібридна нейро-нечітка система* — ANN і нечітка система інтегровані в єдину архітектуру.

Ці системи не слід плутати з *нечіткими нейронними мережами*, які самі є ANN, що використовують нечіткі методи для пришвидшення навчання або підвищення продуктивності. Більш детальний опис нейро-нечітких систем можна знайти у літературі [75].

3.5.3 Огляд генетичних алгоритмів

Генетичні алгоритми (ГА) – це алгоритми пошуку та оптимізації, засновані на принципах теорії еволюції. Основна ідея цих алгоритмів базується на евристичному припущенні, що найкраще рішення, ймовірно, знаходиться в тих ділянках простору рішень, які містять велику частку якісних рішень. Ці області можуть бути ідентифіковані шляхом обґрунтованого та ефективного вибіркового дослідження простору рішень.

Генетичний алгоритм імітує процес природної еволюції, застосовуючи філософію «виживання найсильніших» [76]. У цьому алгоритмі точка в просторі пошуку представлена у вигляді двійкових або десяткових чисел, що називаються рядком або хромосомою. Кожній хромосомі призначається значення, що вказує на те, наскільки вона відповідає поставленій меті. Сукупність хромосом формується у популяцію. Управління популяцією відбувається за допомогою трьох основних операцій:

- розмноження, тобто поточної популяції більшою кількістю якісних хромосом із високими показниками придатності;
- схрещення для генерації нових хромосом шляхом комбінування різних пар хромосом у популяції;
- мутація для внесення невеликих випадкових змін у хромосоми для підтримки різноманітності в популяції.

Послідовність виконання цих операцій утворює одне покоління. Процес повторюється багаторазово, доки система не досягне необхідної точності. Генетичні алгоритми є надзвичайно ефективними у визначенні глобальних мінімумів. Їхньою перевагою є те, що вони не вимагають використання похідних цільових функцій або обмежень, що робить їх універсальним інструментом для вирішення складних оптимізаційних задач

Генетичні алгоритми [77, 78] є складовою штучного інтелекту та методів нечітких обчислень. Вони головним чином застосовуються для вирішення задач оптимізації, які часто виникають у реальних проблемах. ГА є моделлю машинного навчання, яка активно використовується для пошуку рішень складних задач, особливо в інженерних додатках. Наприклад, це може бути пошук різних варіантів конструкцій і їх компонентів, щоб визначити найкращу комбінацію, яка зробить проект більш надійним або дешевшим.

Дещо відмінна класифікація генетичних алгоритмів полягає в наступному:

- ініціалізацію, коли початкова популяція генерується випадковим чином;
- оцінка, як процес, де кожен член популяції аналізується на відповідність поставленим вимогам;
- відбір, де відбираються лише ті особини, які найбільше відповідають заданим критеріям;
- схрещування, де нові особини створюються шляхом комбінування найкращих властивостей обраних особин.

Наприкінці очікується, що це створить об'єкти, які будуть ближчими до заданих вимог. Цей процес повторюється, починаючи з другого етапу, доки не будуть досягнуті умови завершення.

Механіка роботи ГА проста. Основний принцип ГА полягає в кодуванні рішень у вигляді хромосом, представлених як серія двійкових елементів (0 та 1). Набір (популяція) кандидатів рішень генерується та оцінюється. Для кожного рішення в популяції використовується функція придатності, яка визначає його відповідність цільовим критеріям. Найкращі рішення (хромосоми) розділяються на частини та рекомбінуються за допомогою генетичних операторів для отримання нового потомства, яке зазвичай є кращим чи більш відповідним. Основні генетичні оператори, за своєю суттю, є математичними моделями генетичних операцій, що відбуваються в організмі людини. Найпростіша форма ГА включає три типи операторів: вибір (копіювання хромосом до «пулу для схрещування» пропорційно до їх значень придатності); кросовер (часткова заміна генів між хромосомами, що генерує нових нащадків) та мутація (випадкові зміни з невеликою ймовірністю в позиціях хромосоми. Для двійкових строк це означає зміну значення з 0 на 1 або навпаки, див. рис. 3.6.).

Процес, що включає ці операції, повторюється через кілька поколінь, доки не буде досягнуто оптимального рішення. Генетичні алгоритми моделюють процеси, подібні до генетичних механізмів в організмах, і є потужним інструментом для знаходження глобальних мінімумів та вирішення складних інженерних задач

Генетичні оператори мають різний вплив залежно від їх індивідуального чи спільного використання. Наприклад, занадто слабкий відбір може призвести до надто повільної еволюції популяції. У той же час, відсутність мутації може обмежити генетичне різноманіття: наприклад, якщо кожна хромосома в популяції матиме одиницю в першій бітовій позиції, система не зможе створити жодну хромосому, яка починається з нуля [79].

Обчислення генетичного алгоритму зазвичай повторюється від 50 до 500 або більше поколінь. Точний опис того, як працює ГА, можна знайти в [79].

3.5.4 Дослідження штучного інтелекту

У роботі [80] запропоновано метод об'єднання даних з датчиків для оцінювання шорсткості поверхні та відхилення розмірів під час токарної обробки. Систематичний підхід до вибору потенційних датчиків оцінював середній вплив кожного з них на ефективність вимірювальної системи. Датчики, які мали найбільший вплив, було інтегровано за допомогою моделювання штучною нейронною мережею (ШНМ). Отримані результати показали, що створені моделі мали вищу точність порівняно з моделями регресійного аналізу, розробленими для порівняння.

Об'єднання даних сенсорів із застосуванням ШНМ також описано у [72]. Для забезпечення широкого спектра застосувань використовували ємнісні, індуктивні та оптоволоконні датчики. Це дозволило виявляти особливості, які не можуть бути зафіксовані датчиками одного типу. Для навчання ШНМ розміром $17 \times 20 \times 15$ використовували середньоквадратичні значення трьох датчиків, а також тип виробничого процесу (токарна обробка, фрезерування, електроерозійна обробка, шліфування), закодований у двійковому форматі. Результати характеризуються як доволі точні.

Робота [81] складається з двох частин. У першій частині створено три прогностичні моделі з використанням багатошарових мереж функціональних зв'язків для передбачення шорсткості поверхні, сили різання та стійкості інструмента. У другій частині здійснено пошук оптимальних умов різання, об'єднавши моделі для шорсткості поверхні та стійкості інструмента з генетичним алгоритмом. Це дозволило визначити режими різання, які

максимізують швидкість знімання металу за умов дотримання обмежень щодо шорсткості поверхні та терміну служби ріжучого інструмента.

У роботі [82] застосовано двоетапний підхід до оптимізації шорсткості поверхні. На першому етапі результати експериментів використовували для побудови двох математичних моделей шорсткості поверхні методом регресійного аналізу за допомогою методології поверхні відгуку (RSM). На другому етапі модель другого порядку використовували як цільову функцію, яку оптимізували за допомогою генетичного алгоритму (ГА) для визначення умов обробки, що забезпечують бажану якість поверхні.

Поліноміальні мережі розглядалися у [72] для встановлення залежностей між параметрами різання (швидкість різання, подача, глибина різання) та продуктивністю різання (стійкість інструмента, шорсткість поверхні, сила різання). Це дозволило створити базу даних для токарних операцій. Було зазначено, що порівняння поліноміальних мереж із мережами зворотного поширення помилок показало вищу точність прогнозування та меншу кількість внутрішніх зв'язків у перших. Крім того, оптимальну структуру мереж визначали за допомогою алгоритму синтезу поліноміальних мереж (ASPN). Принцип ASPN полягає у виборі мережі, яка є максимально точною, але при цьому якомога менш складною.

У [76] розроблено гібридну модель обробки, що поєднує аналітичні моделі з моделями нейронних мереж для прогнозування ключових характеристик процесу. Аналітичний компонент базувався на теорії прогнозувальної обробки, запропонованій у [77], і забезпечував прогнозування сили різання, температури в зоні різання та геометрії стружки. Він також виконував роль попереднього процесора для моделі нейронної мережі, яка прогнозувала зношення інструмента, шорсткість поверхні та ламкість стружки – характеристики, що не могли бути повністю змодельовані аналітичними методами.

Інший підхід, який використовує критерій автоматичного визначення архітектури мережі, описано в [78]. Метою було створити модель прогнозування ще до початку реального процесу обробки, щоб визначити оптимальні параметри різання (швидкість різання, подачу та глибину різання) для досягнення заданого значення шорсткості поверхні та сили різання. Крім того, на основі отриманих значень сили різання можна було розрахувати потужність різання та оптимальну швидкість знімання металу. Абдуктивні мережі, створені з використанням критерію прогнозованої середньоквадратичної похибки (PSE), показали вищу точність, ніж відповідні моделі регресійного аналізу.

У роботі [81] запропоновано підхід для оцінки впливу характеристик верстата на процеси різання із застосуванням адаптивного прогнозування. Для мережі, яка прогнозувала шорсткість поверхні, входними параметрами були:

швидкість різання, ступінь подібності між різальним інструментом і заготовкою, дискретність стружки (визначалася за її деформацією), утворення наростів на різальній кромці (визначалося за середньою температурою навколо різальної кромки), ширина зношення задньої поверхні інструмента, а також теоретична шорсткість, враховуючи зношення інструмента.

Моделювання із застосуванням інтелектуальних нейронних систем (ІНС) використовували також разом із запланованими експериментами у [83] для торцевого фрезерування. Кінцеву модель було створено з урахуванням таких параметрів: швидкість подачі на зуб, глибина різання, ступінь контакту різального інструмента, використання мастильно-охолоджувальної рідини (МОР), а також компоненти сили різання в напрямку подачі. Результати цього дослідження продемонстрували, що ІНС можуть бути надзвичайно точними навіть для вирішення складних задач, таких як чистова обробка алюмінієвих сплавів. Крім того, використання запланованих експериментів дозволило провести систематичну перевірку топологій ІНС для оптимізації кінцевої топології, яку застосовували в дослідженні.

У дослідженні [84] як вбудований технологічний датчик використовували акселерометр. Після збору даних про вібрації системи "верстат-заготовка" під час кінцевого фрезерування на вертикальному оброблювальному центрі з ЧПК була навчена та протестована нейронна мережа з алгоритмом зворотного поширення помилки. Її метою було не лише розпізнавання шорсткості поверхні у процесі обробки, а й підвищення продуктивності та якості продукції. Крім того, розробили статистичну модель множинної регресії та порівняли її з запропонованою моделлю нейронної мережі. Параметри, що враховувалися: швидкість обертання шпинделя, швидкість подачі, глибина різання та середнє значення вібрації за один оберт (VARP). Було встановлено, що моделі нейронних мереж перевершують у точності всі інші методики.

У роботі [85] запропоновано нову методику — систему розпізнавання стану поверхні під час обробки, яка використовувала нечіткі мережі та систему тестування датчиків для вимірювання шорсткості поверхні в операціях кінцевого фрезерування. Процедура навчання складалася з п'яти етапів: (а) розподіл вхідного простору на нечіткі області, (б) генерація нечітких правил з експериментальних пар даних, (в) уникнення конфліктуючих правил, (г) розробка комбінованих нечітких правил, та (д) визначення системи відображення на основі бази нечітких правил. Потім нечіткі правила та функції приладдя будуть генеруватися та коригуватись відповідно до вимог параметрів управління фрезерною системою. Спочатку цей метод використовувався для одного типу матеріалу та різального. Після цього нечіткі правила та функції належності автоматично генерувалися та коригувалися відповідно до параметрів

управління фрезерною системою. Спочатку метод застосовували для одного типу матеріалу та різального інструмента, але згодом його розширили [86], додавши нові параметри, включно з діаметром інструмента та матеріалом заготовки.

Адаптивна система нейро-нечіткого виводу (ANFIS) та комп'ютерний зір використовувалися для прогнозування шорсткості поверхні при токарній обробці [87]. Система комп'ютерного зору, яка складалася з цифрової камери, підключеної до ПК, та відповідних джерел світла, отримувала зображення поверхні. Ці зображення аналізували для обчислення середнього арифметичного рівня сірості (кількості відтінків сірого). Ця інформація разом із параметрами різання передавалася на чотири входи системи ANFIS, що дозволяло отримувати значення шорсткості поверхні.

Хоча ці методології були розроблені кілька десятиліть тому, останні досягнення у цій галузі, наприклад, вдосконалення алгоритмів навчання нейронних мереж, а також стрімке зростання обчислювальної потужності, знову викликали інтерес дослідників. Очевидно, що підходи, описані в цьому розділі, можуть забезпечити дуже точні результати, а також надати можливість моніторингу або управління процесом в режимі реального часу.

Основні переваги нейронних мереж порівняно з класичним програмуванням полягають у здатності легко працювати з зашумленими або неповними даними, відсутності необхідності чітко формулювати задачу, алгоритм її вирішення чи писати код. Інформація обробляється паралельно в нейронах, що підвищує обчислювальну потужність на відміну від послідовної роботи сучасних комп'ютерів. Найочевиднішим недоліком нейронних мереж є відсутність гарантії їхньої ефективності в конкретних застосуваннях.

Простота використання та ефективність у вирішенні задач багатокритеріальної оптимізації – дві основні переваги підходу генетичних алгоритмів (ГА). Оскільки існують готові до використання реалізації ГА, немає потреби створювати програмний код для обраного застосування з нуля. Єдиною попередньою умовою є кодування даних для формування хромосом і формулювання відповідної функції пристосованості. Проте основним недоліком ГА є їхня висока вимогливість до обчислювальної потужності, оскільки виконання однієї ітерації на типовій платформі ПК може тривати кілька днів.

3.6 Експертні системи

Експертна система також відома як система, заснована на знаннях. Це комп'ютерна система, яка здатна генерувати розумні рішення, наслідуючи здатність експертів-людей приймати рішення. Експертні системи базуються на

правилах і є частиною штучного інтелекту. Вони мають властивості адаптивності, що дозволяє змінювати рішення та приймати нові рішення залежно від зовнішніх факторів. Деякі експертні системи призначені для виконання функцій, що імітують людину, тоді як інші спрямовані на допомогу людині.

Деякі галузі застосування експертних систем це:

- онлайн-медичні системи для діагностики проблеми;
- рішення про фінансові позики/кредити, юридичні питання;
- робототехніка та інженерне проектування.

Однією з головних проблем експертних систем є засвоєння знань. Основними компонентами експертної системи є база знань, механізм інтерфейсу та користувацький інтерфейс. База знань, можливо, є найважливішою частиною будь-якої експертної системи, оскільки це місце збереження інтелектуальної інформації. Експертні системи можуть отримувати нові знання за допомогою своїх датчиків або навчання, розширюючи базу знань, щоб ефективніше реагувати на нові виклики. Знання зазвичай зберігаються у формі операторів IF-THEN-ELSE. Механізм інтерфейсу є посередником між базою знань і користувачем: він приймає рішення, враховуючи умови та вимоги, і надає результати користувачу. Користувацький інтерфейс зазвичай використовує природну мову, зрозумілу для щоденного застосування. Існують два основних типи мов програмування: алгоритмічні та символічні. Традиційне програмування мовами, такими як Pascal, Basic, C і Fortran, належить до алгоритмічних, або процедурних мов, де реалізація логічних висновків є складною.

3.7 Висновки за розділом

У цьому розділі представлено огляд різних підходів, що використовуються для прогнозування шорсткості поверхні, а також наведено коментарі щодо кожного методу в окремих розділах. Як видно з описаних досліджень, у цій сфері в останні роки проводилась активна наукова діяльність, яка дала позитивні результати. Поточна тенденція сприяє створенню більш автоматизованих систем для онлайн-моніторингу, вимірювання або контролю, що пов'язано з високим рівнем автоматизації самих процесів. Усі описані тут методології мають як переваги, так і недоліки порівняно одна з одною, але в контексті сучасних тенденцій найбільш перспективними видаються теоретичні підходи та методи, що базуються на штучному інтелекті (AI).

Порівняння цих двох підходів показує, що AI-моделі враховують особливості обладнання та реальні явища обробки, зберігаючи інформацію з експериментальних даних, які використовуються для створення моделей. З

іншого боку, теоретичний підхід базується на умовностях та ідеалізаціях, які спричиняють похибки та обмеження. На диво, у літературі не виявлено спільних досліджень, що поєднують AI та аналітичне моделювання, яке могло б уточнити або виправити теоретичні моделі.

Інші переваги AI-методів полягають у тому, що створені моделі є найбільш реалістичними й точними, демонструють високий рівень інтеграції з комп'ютерними системами та можуть застосовуватися разом із традиційними методами. Зважаючи на ці факти, можна зробити висновок, що зусиль у цьому напрямку було докладено менше, ніж очікувалося. Це ж стосується і кількості наявних гібридних підходів, таких як нейро-нечіткі системи. Переваги цих підходів, як-от представлення знань у вигляді правил «якщо-то» чи визначення параметрів за допомогою нейронних мереж, мали б стимулювати дослідників до їх використання, проте цього поки що не відбулося.

Оптимізація режимів різання для досягнення заданої шорсткості поверхні – ще одна область, якій приділяється недостатньо уваги. Генетичні алгоритми (ГА) та інші алгоритми оптимізації могли б ефективно застосовуватись у поєднанні з моделями прогнозування шорсткості поверхні, однак, як видно з наведеного вище, подібних підходів поки що виявлено дуже мало.

Варто також зазначити, що, незважаючи на розробку точних моделей, залишаються нерозв'язані проблеми. Деякі аспекти, наприклад, високоточна обробка, де шорсткість поверхні має критичне значення, ще перебувають на стадії дослідження. У майбутніх моделях необхідно враховувати такі фактори, як відхилення ріжучого інструмента або температурні умови, щоб отримати більш реалістичне уявлення про формування шорсткості поверхні.

Ще одним дуже корисним і практичним напрямком може стати інтеграція наявних моделей у більш загальну консультативну систему, яку, наприклад, міг би використовувати оператор верстата.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ЗРАЗКІВ ЗІ СТАЛІ AISI 321 ПІСЛЯ ОБРОБКИ НАНОСЕКУНДНИМ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

4.1 Постановка та реалізація експериментальних досліджень впливу лазерного випромінювання на шорсткості обробленої поверхні зразків із сталі AISI 321

4.1.1 Предмет, цілі та завдання проведення експериментів

Головною метою проведення експериментальних досліджень було визначити вплив різних технологічних режимів обробки поверхні сталі AISI 321 наносекундним лазерним випромінюванням шляхом рядкового сканування на характер і величину шорсткості обробленої поверхні. При цьому основна увага була приділена процесу формування періодичних та можливих 3D структур під час модифікації поверхні сталі лазерним випромінюванням. Предметом експериментальних досліджень було вивчення світловідбивних характеристик поверхні деталі, виготовленої зі сталі AISI 321 після лазерної обробки на різних режимах впливу.

Як основне завдання під час проведення експериментів розглядалося завдання отримання контрольованої шорсткості поверхні періодичних і ймовірних 3D структур, оцінити вплив технологічних чинників обробки (випромінювання) на зміну шорсткості і палітри поверхні.

Науковими і теоретичними передумовами щодо експериментів послужили попередні дослідження з лазерної обробці поверхні різних металів і сплавів, опубліковані у різних літературних джерелах. В цих роботах було показано, що при лазерній модифікації поверхні формується поверхнева 3D структура, яка має значні відмінності від поверхневих структур, притаманних традиційним методам обробки. Така модифікація характеризує посилення процесу структурування оброблюваної поверхні та її періодичності на мікро- та макрорівнях, залежно від умов обробки.

Іншим, не менш важливим завданням експериментальних досліджень, був доказ підтвердження ймовірності формування всіх головних типів 3D структур при лазерному впливі на поверхню зі сталі AISI 321, з формуванням окремо мікрорівня, нанорівня та їх взаємної інтеграції. Це дозволяє за рахунок керування технологічними параметрами створювати дворівневі та багаторівневі 3D структури.

Виявлення реального взаємозв'язку шорсткості поверхні на раціональних режимах лазерної обробки поверхні з параметрами розсіювання випромінювання, також було одним із найважливіших завдань експериментальних досліджень.

4.1.2 Реалізація експериментів. План та основні фактори експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися на зразках розміром 35x75x1 мм, одержаних з листа нержавіючої сталі 12X18H10T (AISI 321). Склад нержавіючої сталі AISI 321 було перевірено за допомогою рентгенівського мобільного флуоресцентного спектрометра Брукер Titan S1 і він повністю відповідає вимогам, що пред'являються до складу нержавіючої сталі AISI 321.

На першому етапі практичних досліджень наносекундного лазерного опромінення було оброблено 11 позицій сталевого зразка малим скануванням з кроком 25 мкм та зі змінними параметрами швидкості сканування – v , мм/с, частоти лазерних імпульсів – f , кГц, та % від потужності лазера у 50 Вт – w , Вт, представлених у табл. 4.1. Усього було опрацьовано 11 зразків.

Таблиця 4.1 – Значення технологічних параметрів обробки

Номер зразка	Швидкість сканування, мм/с	Частота лазерних імпульсів, кГц	% від потужності лазера, Вт
1	150	40	30
2	100	60	30
3	200	40	30
4	100	90	40
5	100	60	35
6	200	50	30
7	200	60	30
8	100	60	40
9	50	90	40
10	150	90	35
11	100	90	35
12	Базова поверхня		

Результат у вигляді фотографій обробленої лазером поверхні представлений на рис. 4.1 для знімків при штучному освітленні і на рис. 4.2 при природному.



Рисунок 4.1 – Вид обробленої поверхні зразків для режимів 1-11 (табл. 4.1) при штучному висвітленні



Рисунок 4.2 – Вид обробленої поверхні зразків для режимів 1-11 (табл. 4.1) при природному висвітленні

4.2 Лабораторне обладнання та технологія проведення експериментів

В експериментах використовувалася серійна лазерна установка «МініМаркер 2» [88]. Це компактне обладнання для маркування та гравіювання на базі волоконного лазера і. Як показав досвід експлуатації, волоконний лазерний випромінювач не потребує особливого обслуговування та витратних матеріалів, дуже надійний, забезпечує тривалу безперебійну роботу навіть у важких умовах експлуатації.



Рисунок 4.3 – Загальний вигляд настільної установки із лазером «МініМаркер 2» [88]

Технічні характеристики лазера «МініМаркер 2» та його компонентів наведено в табл. 4.2.

Лазери «МініМаркер 2» – М10/М20/М30/М50 випускаються в різних видах компонування вузлів: настільному, портальному та ручному. Лазер рекомендований для прецизійного лазерного маркування та гравіювання. До основних промислових застосувань його відносять обробку виробів з:

- дорогоцінних металів;
- медичного інструменту та деталей відповідального призначення;
- виробів із твердих сплавів та кольорових металів;
- деталей із забарвленою, оксидуванням та фосфатуванням поверхні;
- різноманітних металевих деталей із чистою шліфованою поверхнею;
- виробів із деяких видів пластиків, гуми, кераміки.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики системи "МініМаркер 2" – M10/M20/M30/M50 [88]

Загальні	
Габаритні розміри та вага	Блок живлення та управління: 470 x 450 x 320 мм, 25 кг. Маркувальна головка з кронштейном та столом – 375 x 500 x 800 мм, 25 кг
Електроспоживання	~220 В, 50 Гц, до 0,7 кВт
Управління	ПК з програмним комплексом "МаксіГрафТМ"
Лазерний випромінювач	
Тип лазера	Ітербієвий імпульсний волоконний лазер IPG-Photonics
Ресурс лазера	Понад 100 000 годин
Середня вихідна потужність лазера	10, 20, 30 або 50 Вт
Довжина хвилі лазерного випромінювання	1,064 мкм
Частота проходження імпульсів	Регульована від 20 кГц до 100 кГц
Максимальна енергія в імпульсі лазера	0,5 мДж або 1,0 мДж
Охолодження	Автономне повітряне
Система переміщення	
Скануючий пристрій	2-х осьовий сканатор (Cambridge Technology)
Поле обробки	50x50 мм, 110x110 мм, 160x160 мм, 250x250 мм (змінні об'єктиви)*
Програмно-апаратний дозвіл	2,5* мкм
Швидкість переміщення променя	Регульована, до 8,7* м/с
Розмір знаків	від 0,25 до 100 мм
Ширина лінії автоматичного заповнення	до 3 мм
* параметри наведені для установки з об'єктивом 100 x 100 мм, параметри відхиляючої системи залежать від об'єктива, що використовується, і змінюються пропорційно розміру поля маркування. Так, наприклад, для поля обробки 250x250 мм швидкість маркування буде в 2.5 рази вищою і становитиме понад 20 000 мм/с, точність при цьому становитиме 6.3 мкм.	
Програмний комплекс	
Тип зображень, що виводяться	Контурні та растрові, текстові та графічні, штрих-код.

Лазери «МініМаркер 2» – M10/M20/M30/M50 широко використовуються для проведення лабораторних досліджень, різноманітних випробувань та експериментів.

Для виробництва різних вимірювань шорсткості використовувався цифровий мікроскоп KEYENCE VHX 7100 з високою роздільною здатністю [89]. Цей інструмент має оптичний ефект тіні. Він поєднує в собі спеціально розроблені об'єктиви з високою роздільною здатністю, 4K CMOS-камеру та потужне освітлення, яке дозволяє переглядати зображення у кольорі та аналізувати зміни освітлення з різних напрямків. Плавний перехід між різними збільшеннями від 20x до 6000x за допомогою моторизованої револьверної головки забезпечує просте використання середовище перегляду. Цифрові мікроскопи серії VHX відрізняються простотою експлуатації та високою гнучкістю для мікроскопії з високою роздільною здатністю 4K.



Рисунок 4.4 – Загальний вигляд цифрового мікроскопа KEYENCE VHX 7100 [89]

До відмінних рис цифрового мікроскопа KEYENCE VHX 7100

- візуалізація навіть найменших нерівностей з адаптованим управлінням, від фокусування до зміни збільшення;
- моторизований зум від 20x до 6000x для плавного перегляду у високій роздільній здатності;
- висока глибина різкості та гнучкі можливості перегляду та аналізу у 2D та 3D;

- детальні зображення поверхні завдяки інноваційним рішенням у висвітленні;
- автоматичне відтворення налаштувань перегляду та аналізу;
- має можливість налаштування різними способами для індивідуальних прикладних рішень;
- збільшена область аналізу завдяки моторизованому столику діаметром 300 мм.

Технічні характеристики мікроскопа KEYENCE VHX наведено у табл. 4.3

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики мікроскопа KEYENCE VHX 7100

Елемент відображення		1/1,7-дюймовий, 12,22-мегапіксельний датчик зображення CMOS; загальна кількість пікселів: 4168(Г) × 3062(В); віртуальні пікселі: 4024 (Г) × 3036 (В)
Система сканування		Прогресивний
Частота кадрів		30 F/S (макс.)
Дозвіл	Швидкий	2048 (Г) × 1536 (В)
	Стандарт	2880 (Г) × 2160 (В)
	Висока роздільна здатність	2880 (Г) × 2160 (В) (режим 4К ВИМК), 4000 (Г) × 3000 (В) (режим 4К ВМИК)
	Висока точність	12 000 (Г) × 9000 (В) *
Розширений динамічний діапазон		16-бітовий діапазон інтенсивності через дані RGB від кожного пікселя
Приріст		Ручний, встановлений
Електронний затвор		Авто, Ручний, 1/30, 1/60, 1/120, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/5000, 1/9000, 1/19 000
Затвор із суперзарядом		Може бути встановлений з кроком 0,01 с від 0,03 до 4 с
Баланс білого		Натискання, ручне налаштування, попереднє встановлення (2700K, 3200K, 5600K, 9000K)
Вбудоване джерело світла	Тип	Світлодіод високої інтенсивності
	Термін служби	40 тис. годин (референсне значення)
* при використанні функції високої роздільної здатності за допомогою моторизованого зсуву столику.		

При обробці експериментальних даних застосовувалася прецизійна система Brucker Alicona PortableRL. Це безконтактна, оптична, тривимірна, система, що заснована на технології Focus Variation, мобільна система

вимірювань для контролю якості мікроструктурованих поверхонь. Перевірка можлива для полів виміру до 50x50x25 мм. Причому використання можливе як для вигнутих, так плоских деталей. Автономне живлення, гнучке та мобільне позиціонування дозволяє використовувати обладнання скрізь, де це необхідно. Достатньо великий діапазон вертикального сканування дозволяє вимірювати різні геометричні форми. Головні сфери застосування це перевірка якості виробів, 3D-вимірювання сталі та корпусних деталей, які можна скомпонувати таким чином:

- вимірювання форми та шорсткості для великих виробів;
- вимірювання складних форм із кутом нахилу стінок до 86 градусів;
- стійкість до зовнішнього освітлення, коливань температури та вібрацій;
- швидке та просте налаштування оптичного дозволу;
- швидка зміна об'єктива завдяки револьверній обоймі;
- покращена оцінка поверхні завдяки колірній інформації;
- вимірювання великих виробів завдяки великому діапазону переміщення у площині XOY;
- зручна експлуатація завдяки простоті позиціонування на вимірюваному виробі;
- оцінка поверхні по її оптичному зліпку з використанням колірної інформації;
- точне вимірювання виробів із матеріалів з різною відбивною здатністю.



Рисунок 4.5 – Загальний вигляд прецизійної вимірювальної системи
Brucker Alicona PortableR

Таблиця 4.4 - Технічні характеристики прецизійної вимірювальної системи Brucker Alicona PortableR

Позиці- ювання (хуz)	50x50x25 мм = 62 500 мм ³									
Кратність збільшен- ня об'єк- тиву		10x	20x	50x	2x SX	4x Ax	5x AX	10x AX	20x AX	50x SX
Робоча відстань	мм	17,5	16	10,1	34	30	34	33,5	20	13
Діапазон бічних вимірів (X, Y)	мм	2	1	0,4	10	4,87	3,61	2	1	0,4
(X x Y)	мм ²	4	1	0,16	100	23,72	13,03	4	1	0,16
Вертикаль- ний дозвіл	нм	150	75	50	3500	620	460	170	90	70
Похибка кроку по висоті (1 мм)	%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Мінімаль- на вимі- рювана шорст- кість (R_a)	мкм	0,55	0,25	0,2	-	-	-	0,65	0,3	0,25
Мінімаль- на вимі- рювана шорст- кість (S_a)	мкм	0,3	0,15	0,1	-	-	-	0,35	0,15	0,13
Міні- мальний вимірю- ваний радіус	мкм	5	3	2	20	12	10	5	3	2

Для металографічних і матеріалознавчих вимірювань шорсткості використовувався універсальний цифровий оптичний мікроскоп ZEISS AXI0 [90, 91], що дозволяє проводити вимірювання в прямому і відбитому світлі, а також використовувати флуоресцентний аналіз. Загальний вигляд мікроскопа ZEISS AXI0 представлено на рис. 4.6.



Рисунок 4.6 – Загальний вигляд мікроскопа ZEISS AXI0 [90, 91]

Таблиця 4.5 – Складові та організація модульної системи вимірювального комплексу мікроскопа ZEISS AXI0 [90, 91]

Загальні дані та комплектація	
Модульна система	23 конфігурації на основі комбінацій 5 варіантів верхньої частини мікроскопа, 3 штативів та 2 колон для дослідження великих об'єктів (висота колони 380 або 560 мм)
Світлова мікроскопія	Використовуються такі методи: світлого поля, темного поля, фазового розмаїття, інтерференційного розмаїття, поляризаційну мікроскопію, метод дослідження у світлі люмінесценції, метод спостереження в інфрачервоних або ультрафіолетових променях. Окремо можна виділити мікрофотографування та мікрокінозйомку.
Джерела освітлення	Ртутна лампа, що самоналаштовується, НХР 120, галогенна лампа (12В, 50 Вт); джерела освітлення на основі світлодіодів для проходить і відбитого світла (LED) та флуоресцентного аналізу (FL-LED та Colibri) з великим часом експлуатації (15000-30000 год), що дозволяють отримувати зображення без спотворень.
Об'єктиви	1,25х-100х для відбитого та проходить світла: A-Plan, Achroplan, Plan-Neofluar. Загальне збільшення 125-2500х; новий об'єктив ЕС Eriplan для методу диференційно-інтерференційного розмаїття (ДІК). Один ДІК слайдер підходить відразу для трьох об'єктивів із збільшенням 5х, 10х, 20х. Новий об'єктив N-Achroplan розрахований для поля зору 23 мм.
Насадки	Бінокулярна та бінокулярна з фото/відео виходом, та з кутом нахилу окулярних трубок 30°, 20°, 15° (ергономічні насадки). Система додаткової зміни збільшення Optovar (1,6х; 2,5х), 6- або 4-позиційний револьверний пристрій зміни світлодіодних модулів, 2-позиційний слайдер для зміни рефлекторних модулів.
Предметні столики	Механічний, що обертається (360 °), моторизований, столик зі спеціальним твердим покриттям.
Розроблений компанією Carl Zeiss метод С-ДІК (диференційно-інтерференційного розмаїття з круговою поляризацією)	
Метод ПласДІК	Метод «рельєфного» контрастування.
Револьверний пристрій для кріплення 6 об'єктивів	6 отворів для ДІК слайдерів; 3 отвори для ДІК слайдерів.

4.3 Основні результати розподілу шорсткості обробленої поверхні та значень її величини, отримані експериментально

Лазерна обробка поверхні зразків із сталі AISI 321 проводилася для 4-х зразків відповідно до технологічних параметрів, наведених у табл. 4.6. Сканування проводилося рядками вздовж осі X зі зміщенням рядків по осі Y. У цих напрямках проводилося дослідження шорсткості поверхні.

Таблиця 4.6 - Значення технологічних параметрів обробки

Номер зразка	Швидкість сканування, мм/с	Частота лазерних імпульсів, кГц	% від потужності лазера
1	100	50	15
2	150	40	20
3	150	40	30
4	100	60	40
5	Базова поверхня		

За допомогою оптичного мікроскопа Bruker Alicona PortableRL було проаналізовано структуру поверхні 4-х зразків у напрямку X та Y при збільшенні мікроскопа X50.

На рис. 4.7 – 4.10 представлені результати дослідження шорсткості обробленої поверхні [92, 93]. На рис. 4.7 наведено загальний вигляд оброблених поверхонь, а на рис. 4.8 представлений діапазон розподілу висот і западин зразків 1-4. Аналіз цих рисунків дозволяє зробити такі висновки.

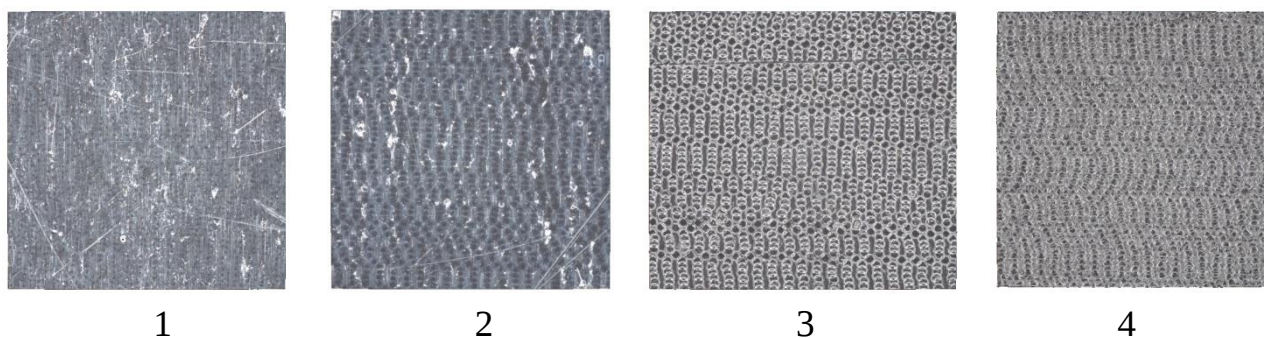


Рисунок 4.7 – Загальний вид оброблених зразків 1-4

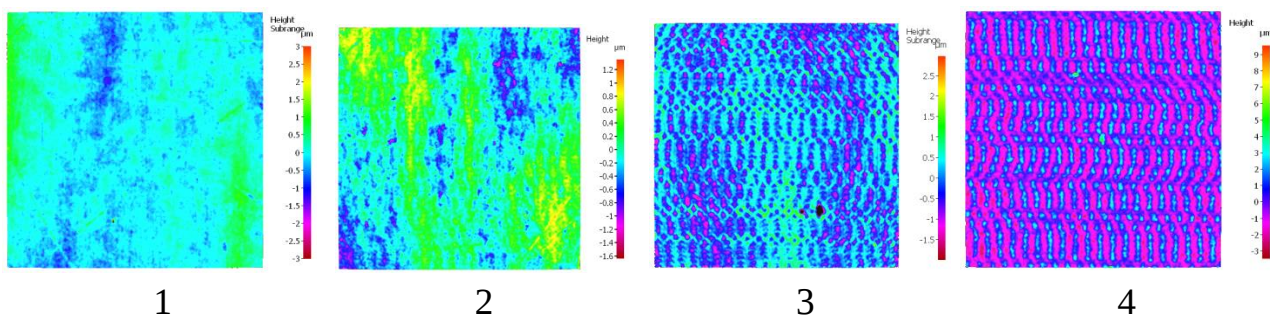


Рисунок 4.8 – Діапазон розподілу висот та западин зразків 1-4

Темні точки на поверхні вказують напрямок сканування лазерним променем (рис. 4.7). Мінімальний розмір точок свідчить про початок модифікації поверхні, але він не дуже важливий. Вивчення даних на рис. 4.8 свідчить, що діапазон висот розподіляється у проміжку $\sim +1,0 \div -1,0$ мкм для 1-го зразка. Більш детальний аналіз профілограм обробленої поверхні у напрямку X та Y (рис. 4.9) показав розподіл діапазону висот у напрямку X у межах від -0,8 мкм до +0,8 мкм. Аналіз профілограми в поперечному напрямку обробки Y показав, що шорсткість обробленої поверхні має вищі показники і відповідає діапазону від -0,6 до +0,15 мкм. Параметри шорсткості згідно стандарту ISO 25178 представлені в табл. 4.7. З рис. 4.7 – 4.9 можна зробити висновок, що шорсткість поверхні зразка 1 носить нерівномірний характер і має значні перепади. Розподіл шорсткості загалом має випадковий характер.

Таблиця 4.7 – Результати дослідження шорсткості зразків 1-4 та базового зразка згідно стандарту ISO 25178

Параметр	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4	Зразок 5 «База»
$Sa, \mu m$	0.250	0.275	0.378	1.004	0.236
$Sq, \mu m$	0.337	0.342	0.490	1.234	0.312
$Sp, \mu m$	3.228	1.319	2.960	9.380	6.037
$Sv, \mu m$	33.821	1.636	7.679	3.087	42.441
$Sz, \mu m$	37.049	2.955	10.639	12.466	48.479
$S10z, \mu m$	9.523	2.479	5.603	9.285	4.444
Ssk	-5.250	-0.061	-0.961	0.438	-2.008
Sku	493.936	2.798	14.016	2.716	412.266
Sdq	0.099	0.040	0.095	0.222	0.043
$Sdr, \%$	0.339	0.082	0.453	2.420	0.099
$FLTt, \mu m$	37.049	2.955	10.639	12.466	48.479

Для оцінки характеристик шорсткості поверхні сплаву AISI 321 також скористаємося параметром ISO (FLTt). Параметр ISO (FLTt) не входить до ISO 2518, однак він широко використовується в дослідженнях шорсткості. Цей параметр характеризує відхилення вимірюваної поверхні від ідеальної. Це відстань між двома паралельними площинами, отриманими шляхом апроксимації Чебишева до поверхні. Це математичний метод, що ефективно використовує дві паралельні площини для «стиснення» точок даних поверхні зсередини, і зовні, регулюючи кут, щоб мінімізувати відстань між площинами.

Оброблена поверхня для зразка 2 представлена рис. 4.7, 4.8. Темні точки на поверхні вказують напрямок сканування. Розмір лазерних слідів свідчить про модифікацію поверхні та характеризує початок створення періодичних структур на поверхні обробленої сталі. На рис. 4.8 кольоровий градієнт зразка 2 показує загальний розподіл шорсткості поверхні за площиною обробки, який можна оцінити, використовуючи колірну шкалу від -0,9 до +0,9 мкм. Для уточнення діапазону висот шорсткості обробленого зразка було виконано дослідження профілограм поверхні у поздовжньому та поперечному напрямках (рис. 4.9). Аналіз профілограм обробленої поверхні у напрямку X показав розподіл діапазону висот у межах від -0,5 мкм до +0,5 мкм, у поперечному напрямку Y, показав, що шорсткість обробленої поверхні має вищі показники і відповідає діапазону - 0,7 мкм до +0,75 мкм.

Принципово можна зробити висновок, що оброблена поверхня 2-го зразка зі сталі AISI 321 також не є рівномірною і має значні перепади, а її характер можна описати як квазіперіодичний.

Для повного представлення шорсткості обробленої поверхні були проведені комплексні вимірювання морфологічних властивостей поверхні зразків за 11 параметрами, представлені в табл. 4.7.

Дослідження для зразка 3 показали таке. Випробування проводилися з використанням цифрового оптичного мікроскопа Bruker Alicona PortableRL із збільшенням зображення X50 та цифрового оптичного мікроскопа ZEISS AXIO із збільшенням зображення X100. На зображенні (рис. 4.7) добре видно форму кратерів, сформованих лазерним променем і лінії сканування лазерного променя. Великий розмір точок свідчить про інтенсивну модифікацію поверхні, що в порівнянні з зразками 1 і 2 модифікація для зразка 3 має більш істотний характер.

На рис. 4.8 градієнтна шкала показує загальний розподіл шорсткості поверхні обробленого зразка, який можна оцінити, використовуючи колірну характеристику зображення. Результат оцінки дозволив визначити діапазон шорсткості від -1 мкм до +1 мкм. Для уточнення діапазону висот шорсткості обробленого зразка було виконано дослідження профілограм поверхні у поздовжньому та поперечному напрямках (рис. 4.10).

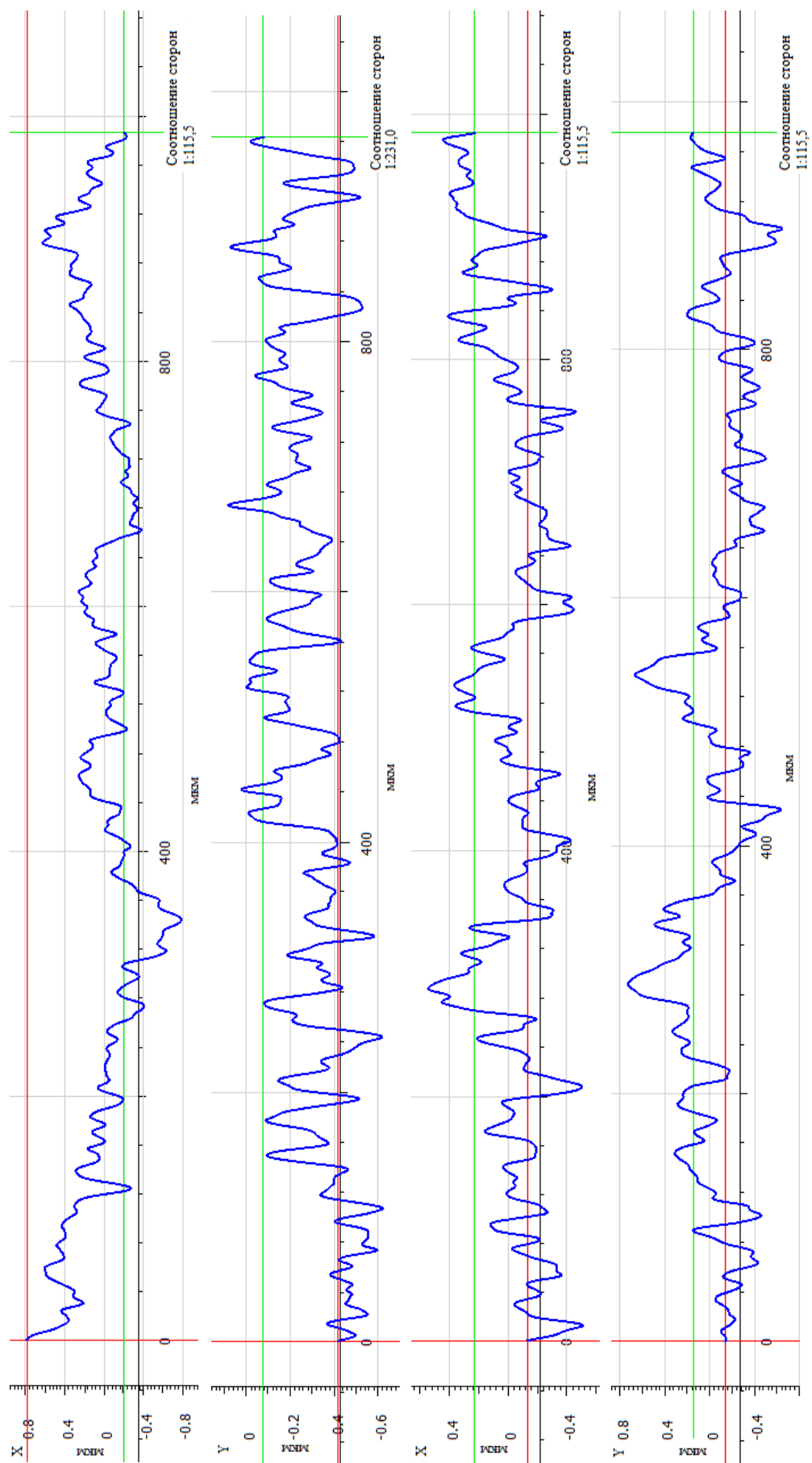


Рисунок 4.9 – Профиліограми обробленої поверхні образців 1,2 в напрямленні X и Y

Рисунок 4.9 – Профиліограми обробленої поверхні зразків 1,2 у напрямку X та Y

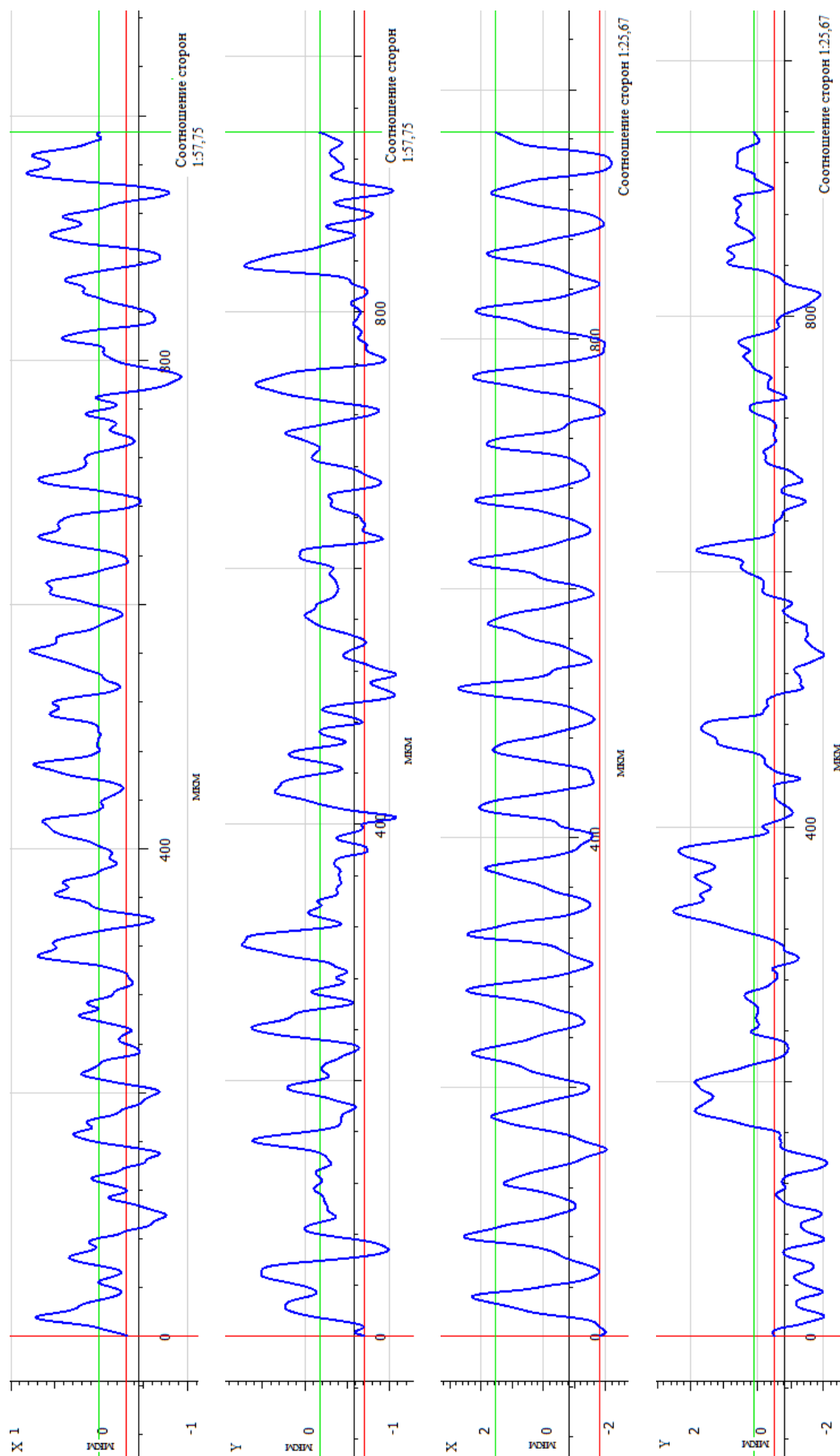


Рисунок 4.10 – Профілограми обробленої поверхні зразків 3,4 у напрямку X та Y

Аналіз філограм обробленої поверхні у поздовжньому напрямку (рис. 4.10) показав розподіл діапазону висот у межах від $-0,93$ мкм до $+0,75$ мкм. Аналіз в поперечному напрямку обробки показав, що шорсткість обробленої поверхні має більш високі показники та відповідає діапазону -1 мкм до $+0,8$ мкм.

За результатами аналізу можна зробити висновок, що поверхня для зразка 3 (рис. 4.11, а) нерівномірна і має перепади, відрізняється від попередніх поверхонь частковою відсутністю мінусових значень. Вона має виражену періодичну структуру, рис. 4.11, б, яка добре спостерігається на мікрорівні у напрямку X . Характерні парні малі коливання на вершинах спектра, що відображають наявність шорсткості на нанорівні, яка присутня на основній 3D мікроструктурі, рис. 4.11, в.

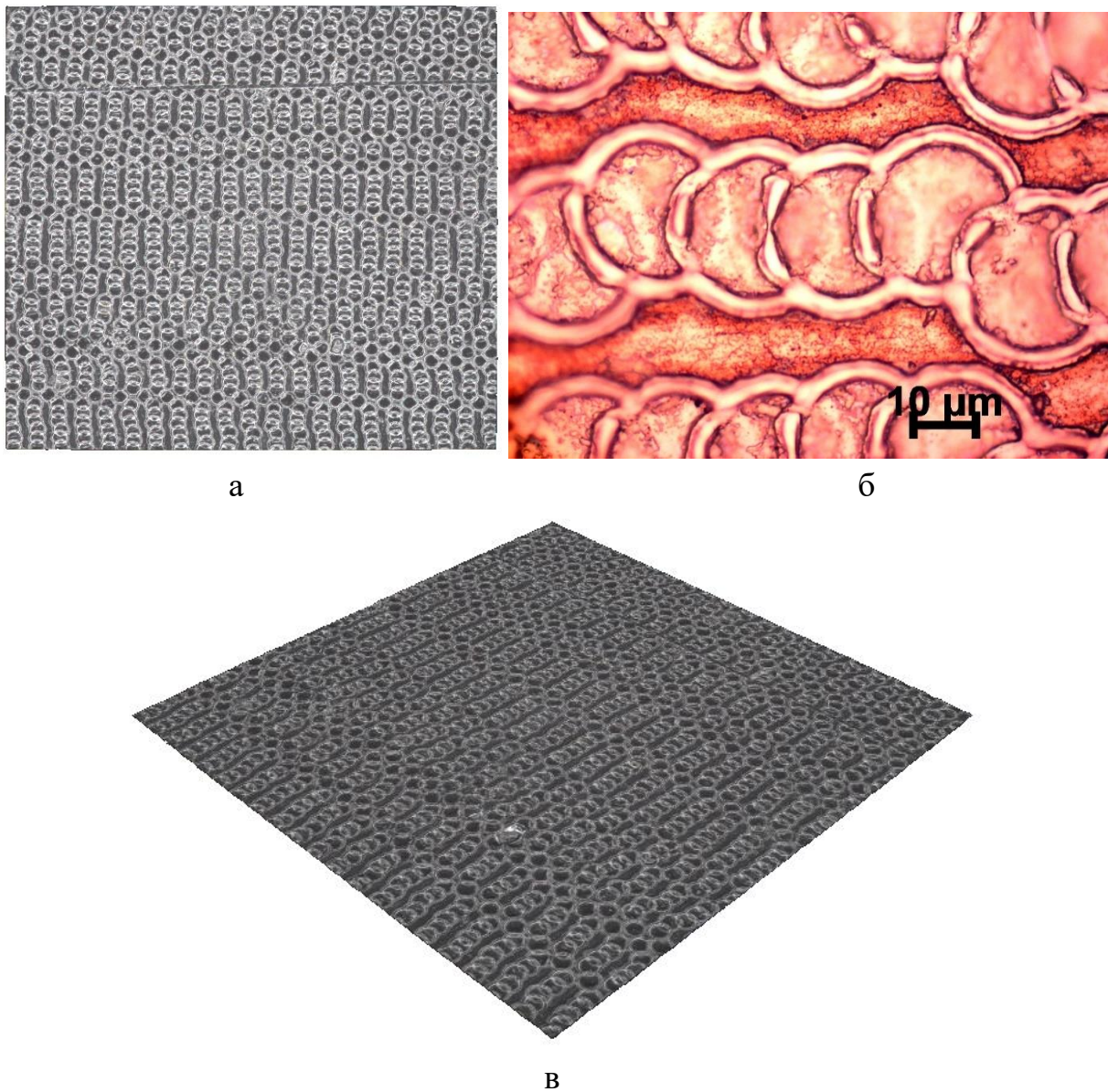


Рисунок 4.11 – Поверхня зразка 3 після обробки лазерним наносекундним опроміненням: а – при збільшенні мікроскопа $X50$; б – зі збільшенням мікроскопа $X100$; в – 3D зображення сканованої поверхні

У напрямку Y періодичність 3D структур також присутня, але мають місця зниженої шорсткості при неявній періодичності. Така поведінка, швидше за все, пов'язана із зоною відсутності перекриття лазерних плям обробки. Доповнене дослідження поверхні за 11 параметрами представлено в табл. 4.7.

Аналіз структурованої поверхні зразка 4 проводився з використанням цифрового оптичного мікроскопа Bruker Alicona PortableRL [96, 97] зі збільшенням зображення X50 і цифрового оптичного мікроскопа ZEISS AXIO зі збільшенням зображення X100.

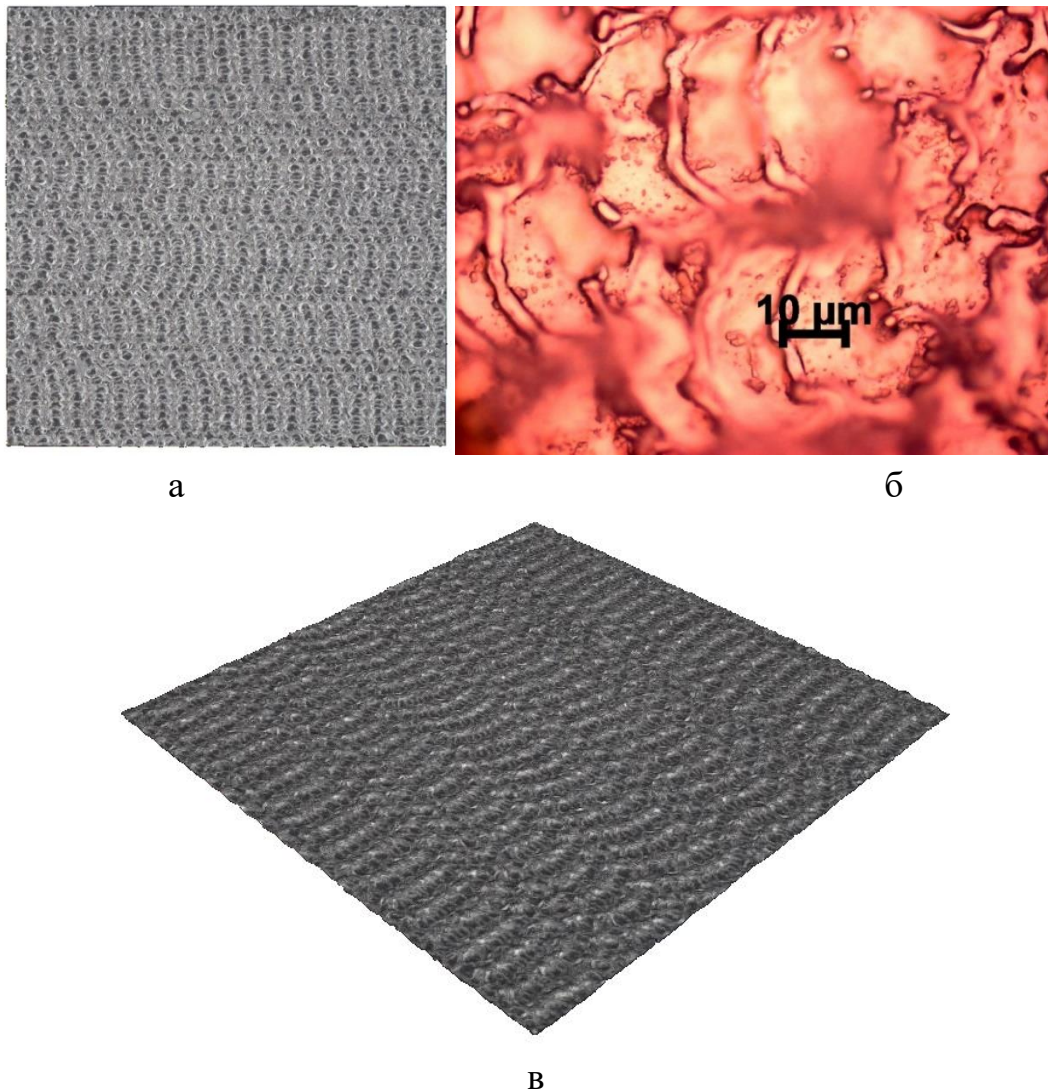


Рисунок 4.12 – Поверхня зразка 4 після обробки наносекундним лазерним опроміненням: а – зі збільшенням мікроскопа X50; б – зі збільшенням мікроскопа X100; в – 3D зображення сканованої поверхні

На рис. 4.12 можна спостерігати наявність явних періодичних поверхневих структур, що є результатом зміненого характеру абляції через збільшеної потужності лазерного випромінювання. На рис. 4.8 градієнтна шкала вказує на загальний розподіл шорсткості поверхні обробленого зразка, який можна

оцінити, використовуючи колірну характеристику зображення, від -2 мкм до +2,5 мкм. Для уточнення діапазону висот шорсткості обробленого зразка було виконано дослідження профілограм поверхні в поздовжньому та поперечному напрямках, рис. 4.11. Було зроблено висновок, що діапазон висот розподіляється в проміжку від -2.0 мкм до +2.5 мкм. Також простежується періодичність нерівностей щодо їх розташування на поверхні. Більш наочно та докладно профілограми поздовжньої та поперечної шорсткості обробленої поверхні представлені на рис. 4.12.

З аналізу даних можна також зробити висновок, що поверхня зразка 4 не рівномірна і характеризується значними перепадами висот і западин шорсткості. Відмінність від попередніх зразків полягає у частковій відсутності великих мінусових значень (впадин) і має чітко виражену періодичну структуру. Періодичність добре видно на мікрорівні у напрямку X (рис. 4.12, а). Наявність наноструктур на поверхні 3D мікроструктур можна відзначити на діаграмах шорсткості в напрямку Y . Характерні парні малі коливання на вершинах спектра відображають наявність шорсткості на нанорівні, що присутня на основній 3D мікроструктурі. Доповнене дослідження поверхні за 11 параметрами шорсткості представлено у табл. 4.7.

4.4 Аналіз шорсткості та хвилястості, періодичних 3D мікроструктур

Отримані характеристики оброблених зразків 1-4 порівнювалися з характеристиками базової поверхні, попередньо обробленої лазерним опроміненням. Для проведення порівняльних досліджень також використовувався цифровий оптичний мікроскоп Bruker Alicona PortableRL зі збільшенням зображення X50 та цифровий оптичний мікроскоп ZEISS зі збільшенням зображення X100. Поверхня зразка "База" до обробки наносекундним лазерним опроміненням представлена на рис. 4.13.

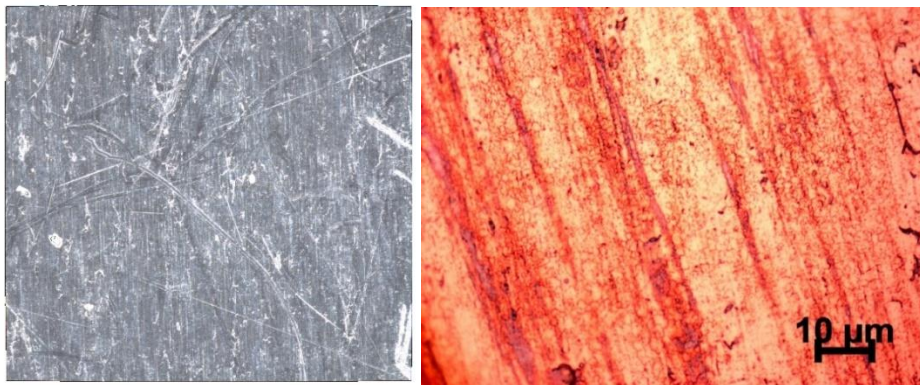


Рисунок 4.13 – Поверхня зразка сталі AISI 321 («База») без обробки: а – зі збільшенням мікроскопа X50; б – зі збільшенням мікроскопа X100

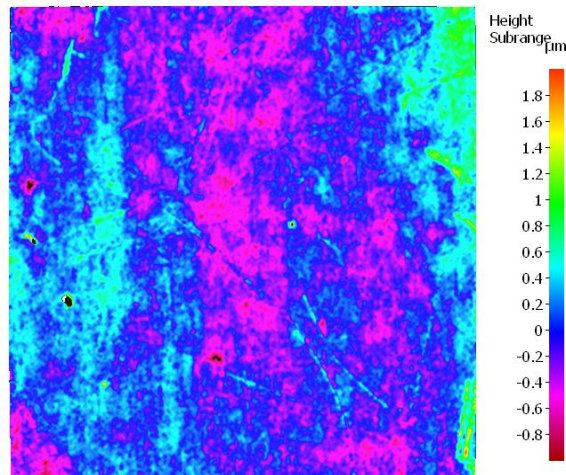


Рисунок 4.14 – Діапазон висот позиції «База» зі збільшенням мікроскопа X50

З даних представлених на рис. 4.14 можна зробити висновок, що діапазон висот розподіляється в проміжку від -0,8 до +0,8 мкм мкм. Також на поверхні простежується виражена стохастичність висот та западин.

На рис. 4.15, 4.16 представлені профілограми оброблюваного зразка «База» при вимірі шорсткості в напрямках X і Y . Аналіз поверхні дозволяє зробити висновок про те, що поверхня зразка «База» нерівномірна і має суттєві перепади. Шорсткість поверхні у напрямку X більша (-0,8мкм; +0,8мкм) ніж у напрямку Y (-0,7мкм; +0,25мкм). Це можна пояснити напрямом пластичної деформації поверхні сталі під час виготовлення її способом прокатки.

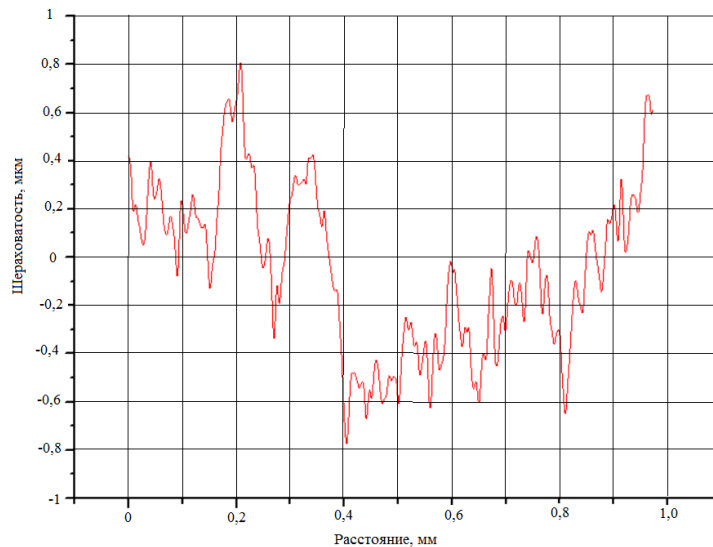


Рисунок 4.15 – Збільшена профілограма зразка «База» при вимірюванні шорсткості в напрямку X

Результати вимірювання шорсткості зразка "База" за 11 параметрами шорсткості наведені в табл. 4.7.

Загалом визначення точних значень параметрів шорсткості поверхні після лазерної модифікації практично не вирішуване завдання. Це зумовлено неоднозначним і складним характером руйнування поверхні, що має квазістабільний характер. Тож отримання більш достовірної інформації вимір параметрів шорсткості зразків проводився щонайменше 5 разів і параметри усереднювалися. Такі узагальнені результати досліджень зведено у табл. 4.8.

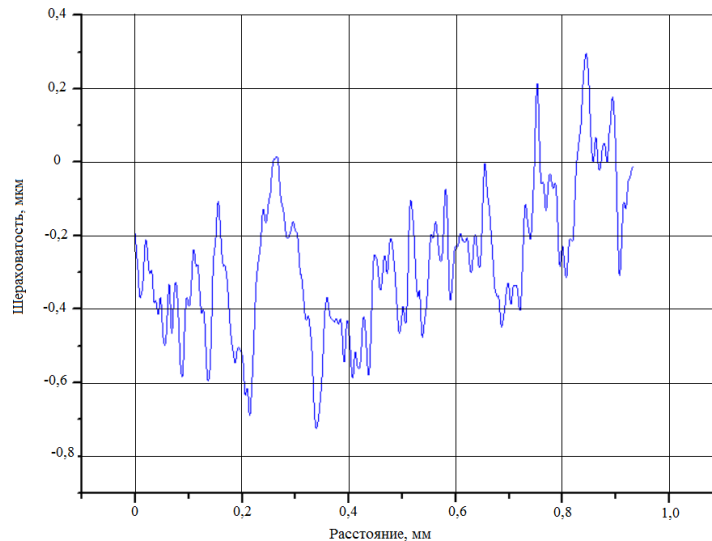


Рисунок 4.16 – Збільшена профілограма зразка «База» при вимірюванні шорсткості в напрямку Y

Таблиця 4.8 – Результати дослідження шорсткості зразків 1-4 та базового зразка, усереднені за п'ятьма вимірами

Параметр	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4	Зразок 5 «База»
$Sa, \mu\text{m}$	0.24	0.28	0.36	1.02	0.19
$Sq, \mu\text{m}$	0.31	0.34	0.45	1.24	0.24
$Sp, \mu\text{m}$	1.38	1.32	1.83	5.05	1.60
$Sv, \mu\text{m}$	1.40	1.64	1.73	3.10	1.10
$Sz, \mu\text{m}$	2.78	2.96	3.56	8.15	2.70
$S10z, \mu\text{m}$	2.54	2.48	3.27	7.55	1.85
Ssk	0.02	-0.06	-0.05	0.42	-0.15
Sku	3.59	2.80	2.89	2.64	3.59
Sdq	0.04	0.04	0.09	0.22	0.04
$Sdr, \%$	0.07	0.08	0.39	2.47	0.07
$FLTt, \mu\text{m}$	2.78	2.96	3.56	8.15	2.70

Представлена на рис. 4.13 топографія поверхні сплаву AISI 321 до лазерної обробки (зразок «База») та після (зразки 1-4) свідчить про явне посилення змін у структурі поверхні з підвищенням інтенсивності обробки, що підтверджується появою періодичності поверхневих 3D структур. Періодичність структури знайшла своє відображення у значенні параметрів текстури поверхні Ssk і Sku (табл. 4.8). Значення Ssk відображає ступінь усунення форми шорсткості і вказує на відхилення нижче за середнє зміщення площини у зразку 4 ($Ssk = 0.42$). У порівнянні зі зразком 4 інші зразки не показують значних відхилень. Важливим питанням є ексцес Sku виділеної області, що вказує на те, що розподіл за висотою для зразка 2 – $Sku = 2.8$, 3 – $Sku = 2.89$ та 4 – $Sku = 2.64$ перекошений вище за середню площину. Однак близькість до значення 3 свідчить про співіснування гострих та вдавлених частин. У разі зразка 1 та зразка «База» $Sku > 3$, що підтверджує шиповидний характер розподілу за висотою.

Параметр Sdr (відсоткове відношення додаткової площі області визначення, що припадає на текстуру, порівняно з плоскою областю визначення) має найбільші значення для шорсткості зразка 3 ($Sdr = 0,39\%$) та 4 ($Sdr = 2,47\%$). Це підтверджує те, що похибка створення попередньо плоскої базової поверхні була малою – $Sdr = 0,07\%$.

На рис. 4.17, 4.18 представлений результат порівняння основних параметрів шорсткості профілів Sa , Sq , Sz для оброблених зразків/

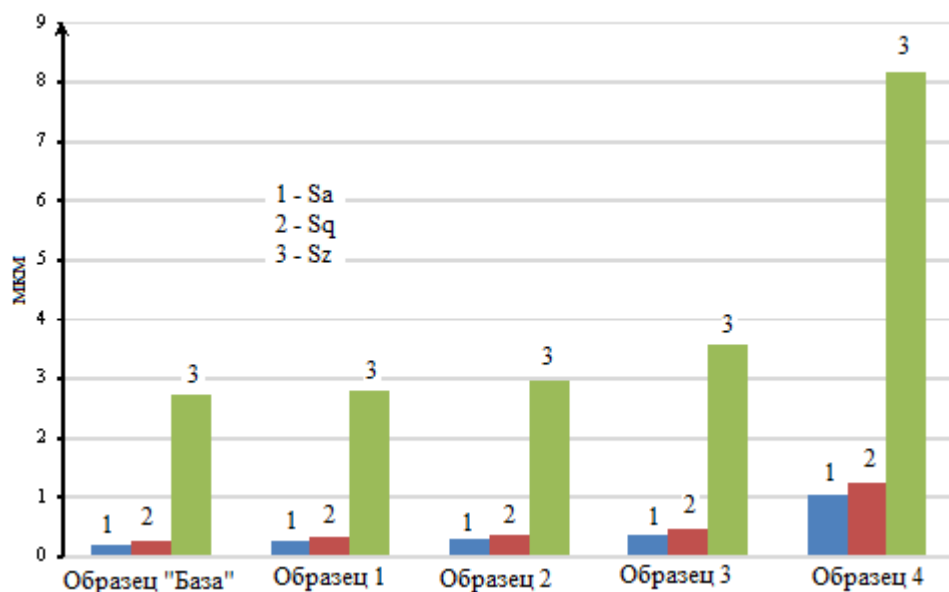


Рисунок 4.17 – Порівняння основних параметрів шорсткості Sa , Sq , Sz

Такий розподіл максимальної висоти пиків виділеної області Sz вказує на домінування пиків у зразку 4 ($Sz = 5,05$). Ці результати можуть бути внаслідок

скупчення розплаву, що відбувається внаслідок плавлення матеріалу або утворення значної кількості оксидів, тим більше що відношення S_v між усіма зразками подібніше між собою, ніж S_p . Параметри S_z та S_{10z} підтверджують наведені вище результати.

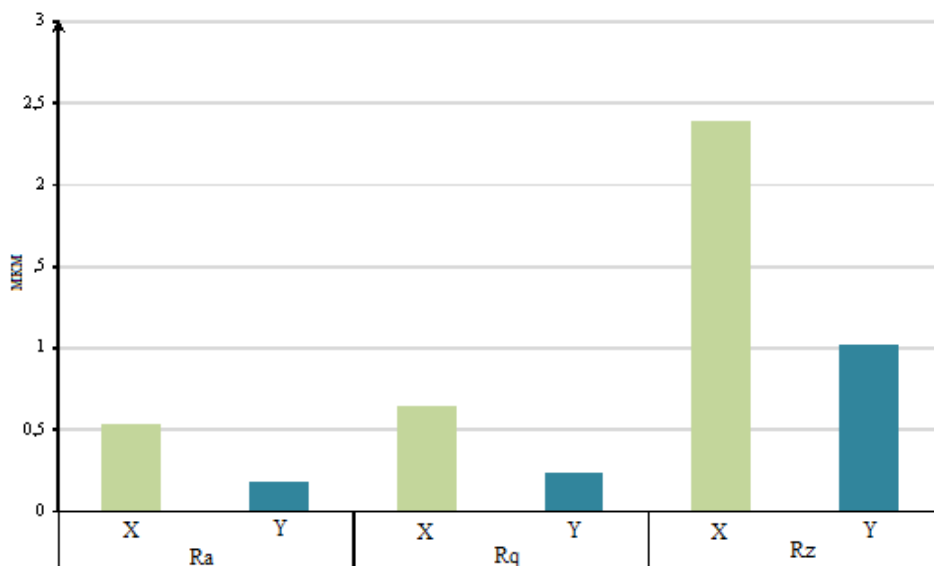


Рисунок 4.18 – Порівняння параметрів шорсткості профілю для обробленого зразка 4 у напрямку вимірювань X та Y

Параметри профілю шорсткості R_a , R_q та R_z обробленої поверхні представлені в табл. 4.9. З аналізу експериментальних даних видно, що ділянки оброблених зразків 3 та 4 демонструють розвинений рельєф профілю. Значний вплив напрямку вимірювання для параметрів R_a , R_q і R_z спостерігається для поверхонь зразків 3 і 4, і при цьому для зразків 1 і 2 така залежність виражена значно слабше. Слід зазначити, що вищі значення вимірних параметрів спостерігаються на поверхні при вимірі профілю за напрямом X , що відповідає напрямку сканування лазерного променя.

Таблиця 4.9 – Параметри профілю шорсткості обробленої поверхні для різних зразків

Параметр	Напрямок	«База»	1	2	3	4
R_a	X	0.046	0.049	0.08	0.195	0.532
	Y	0.036	0.043	0.027	0.074	0.183
R_q	X	0.057	0.063	0.094	0.234	0.639
	Y	0.046	0.053	0.035	0.092	0.231
R_z	X	0.234	0.297	0.34	0.874	2.384
	Y	0.188	0.241	0.157	0.396	1.021

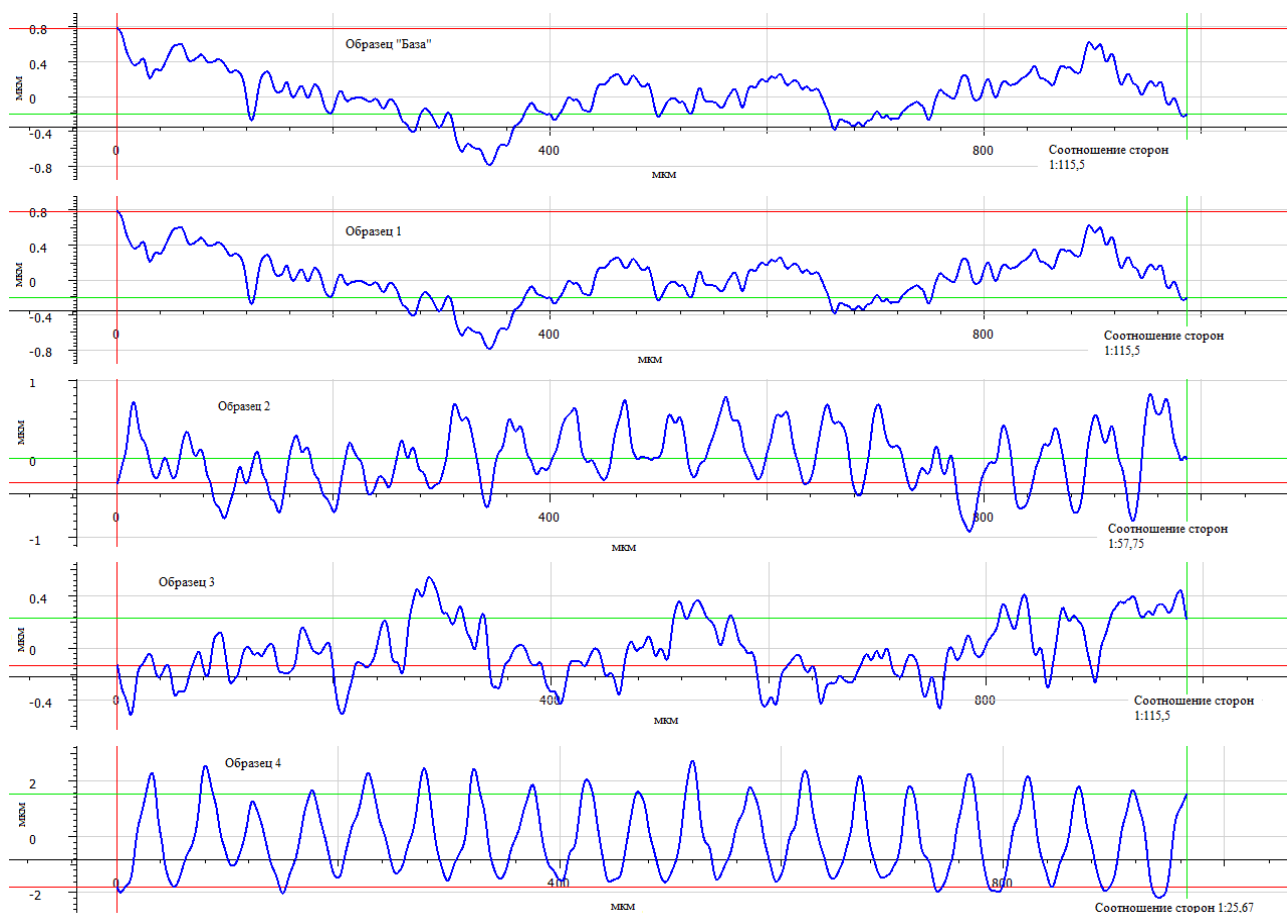


Рисунок 4.19 – Аналіз шорсткості профілів оброблених зразків: поверхня обробки «База»; 1 - 4 – поверхні після лазерного текстурування (вимірювання проводилося у напрямку X)

Це дозволяє зробити висновок, що модифікація поверхні пов'язана не тільки з інтенсивністю процесу опромінення, але й напрямом сканування лазерним променем.

Узагальнені результати перерізів профілю шорсткості оброблених зразків у напрямку X представлені на рис. 4.19. Аналіз результатів показує підвищення рівня періодичності структури з інтенсифікацією лазерної обробки. Це також підтверджується зміною ексцесу (S_{ku}).

Аналіз отриманих даних дозволив зробити висновок, що при низької інтенсивності лазерного випромінювання на поверхні формується шорсткість з імовірним (випадковим) розподілом амплітуд і 3D форм створюваних структур (рис. 4.20, 1 – 2). Для обробленої поверхні зразка 1 спостерігається ефект полірування поверхні. Про це свідчить зменшення діапазону випадкових коливань осцилограми (рис. 4.19), що можна пояснити згладжуванням максимальних виступів пиків профілю, про що свідчить зменшення параметра S_p . У разі збільшення інтенсивності лазерного випромінювання як, наприклад,

для зразка 2, починається більш інтенсивна реструктуризація поверхні та формування періодичних структур, які можна охарактеризувати як квазівипадкові. При подальшому збільшенні інтенсивності формується квазіперіодичний (рис. 4.20, зразок 3) та повністю періодичний профіль (рис. 4.20, зразок 4). Це знайшло своє відображення у зміні параметрів Ssk та Sku .

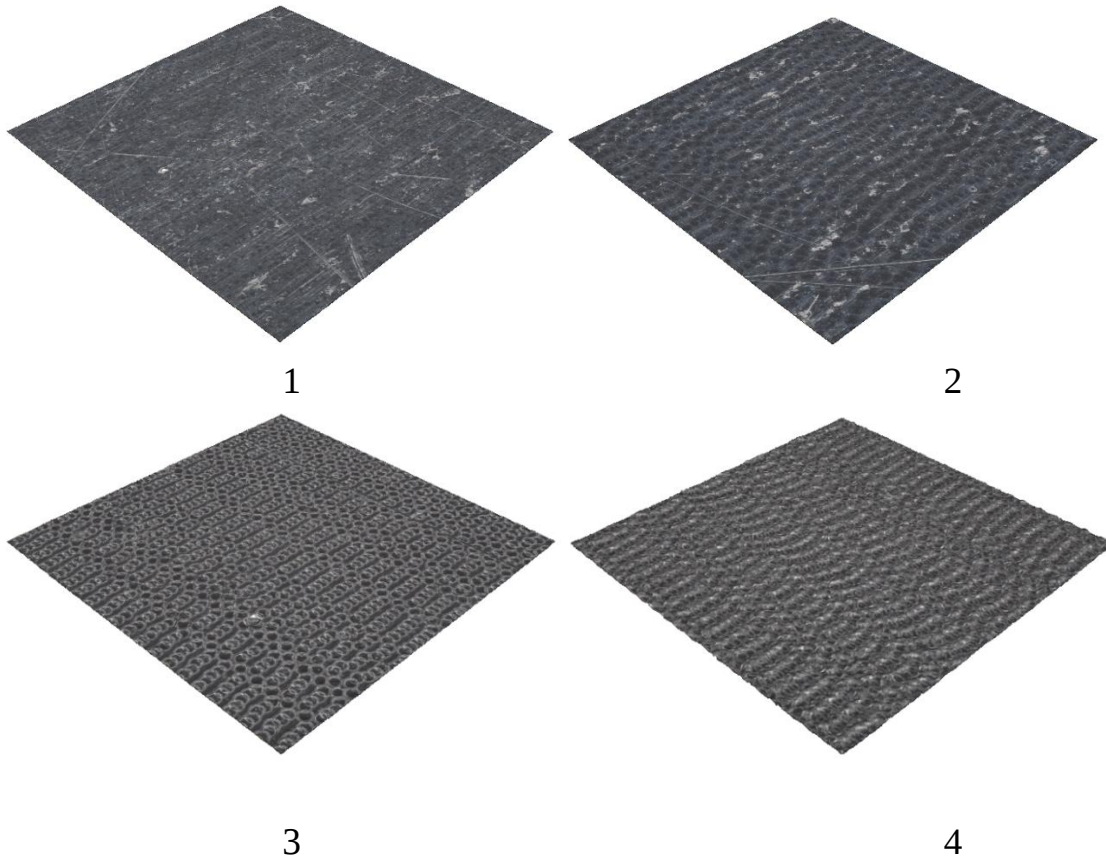


Рисунок 4.20 – 3D зображення оброблених лазером поверхонь зразків 1-4

Тут особливо слід зазначити, що лазерне випромінювання дозволяє змінювати ступінь зсуву форми шорсткості та ексцесу. Ці параметри важливі при розгляді процесів поглинання та розсіювання електромагнітних хвиль по поверхні. Збільшення площі поверхні (параметр Sdr) є сприятливим чинником під час розгляду адсорбції. Анізотропія шорсткості поверхні вздовж ліній сканування лазерного променя може дуже ефективно використовуватися під час розгляду питань трибології. Крім того, слід зазначити, що наносекундне лазерне випромінювання є унікальним технологічним інструментом, що дозволяє створювати поверхні як випадкової, так і періодичної структури.

4.5 Аналіз шорсткості поверхні методом атомної силової мікроскопії після наносекундного лазерного опромінення

Для більш достовірного та ретельного аналізу шорсткості та топографії обробленої поверхні 4 зразків (табл. 4.6, рис. 4.8 – 4.11) було проведено аналіз даних за допомогою мікроскопа Bruker Dimension Icon (BDI) [94, 95], який використовує метод атомної силової мікроскопії (AFM).

На рис. 4.21 для зразка 1 представлена фотографія поверхні в момент сканування кантилевером мікроскопа. На цьому рисунку можна ідентифікувати структуру обробленої поверхні та розрізнити місця лазерного впливу у вигляді світлих точок, а також оцінити їх розподіл.



Рисунок 4.21 – Структура поверхні обробленого зразка 1 у момент сканування кантилевером мікроскопа

Аналіз розподілу висот 3D нерівностей на поверхні досліджуваного зразка дозволив зробити висновок, що їх діапазон знаходиться в межах від -233,5 нм до 211,3 нм (рис. 4.22).

Оцінка точності вимірювання 3D нерівностей шорсткості для дослідного зразка 1 не перевищувала діапазон -12,1...6,3 нм (рис. 4.23). За наведеними на рисунку результатами можна дійти до висновку, що у поверхні довжиною 90 мкм максимальна похибка вимірювання амплітуди поверхні виступів трохи більше 6.3 нм, похибка вимірювання амплітуди западин лежить на поверхні трохи більше -12.1 нм.

На рис. 4.22 представлена картина розподілу поверхневих змін області поверхні розміром 90х90 мкм з урахуванням висоти структурних елементів профілю. Аналізуючи дані можна зробити висновок про рельєф та властивості поверхні.

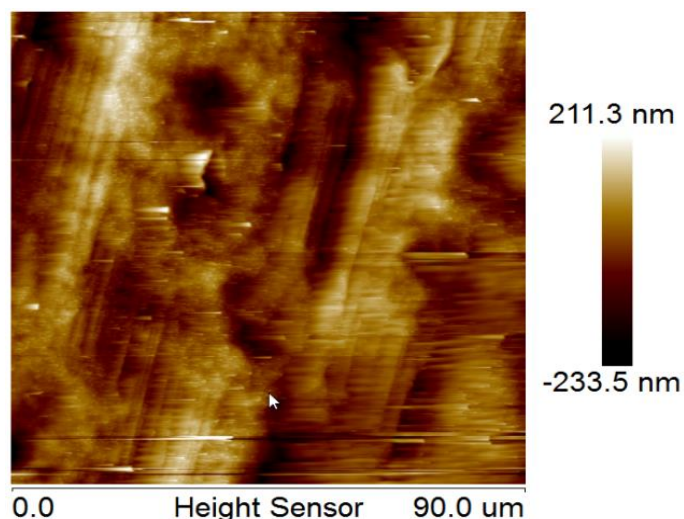


Рисунок 4.22 – Дані про висоту мікрорельєфу в процесі дослідження АФМ мікроскопом за параметрами зміни п'єзона напрути на головці із замкнутим контуром (зі зниженням дрейфу та рівня шуму) для зразка 1

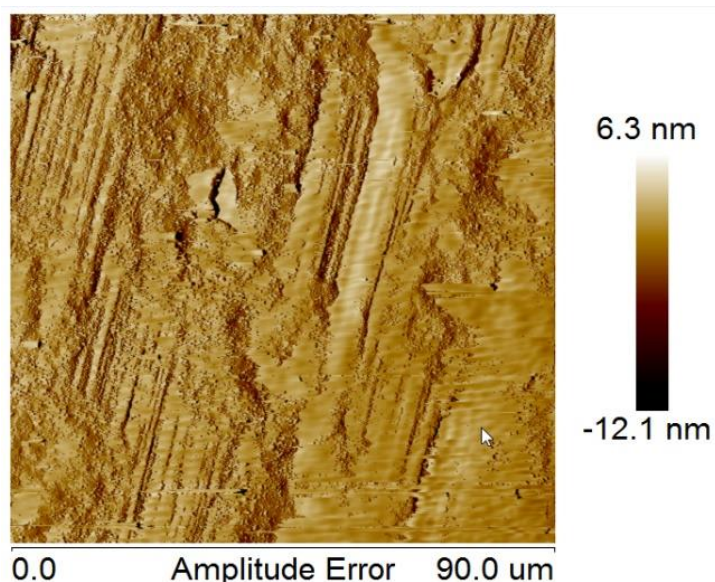


Рисунок 4.23 – Аналіз похибки вимірювання щодо зразка 1

З середнього (35.6°) значення максимального позитивного зміщення фази на ділянках мікроструктури, що відповідають западинам, слідує, що випромінювання змінило властивості матеріалу в зонах лазерного впливу, але на багатьох ділянках структура зберегла властивості первинної поверхні, що підтверджується 3D зображенням структури (рис. 4.24). З підвищеного рівня зміни (-58.0°) значення мінімального негативного зміщення фази на рельєфних ділянках мікроструктури можна зробити висновок про помітний вплив енергії лазерного променя на деяких ділянках, що надає поверхні дрібнорельєфної структури і, як наслідок, підвищило її контрастність (3D зображення структури на рис. 4.24).

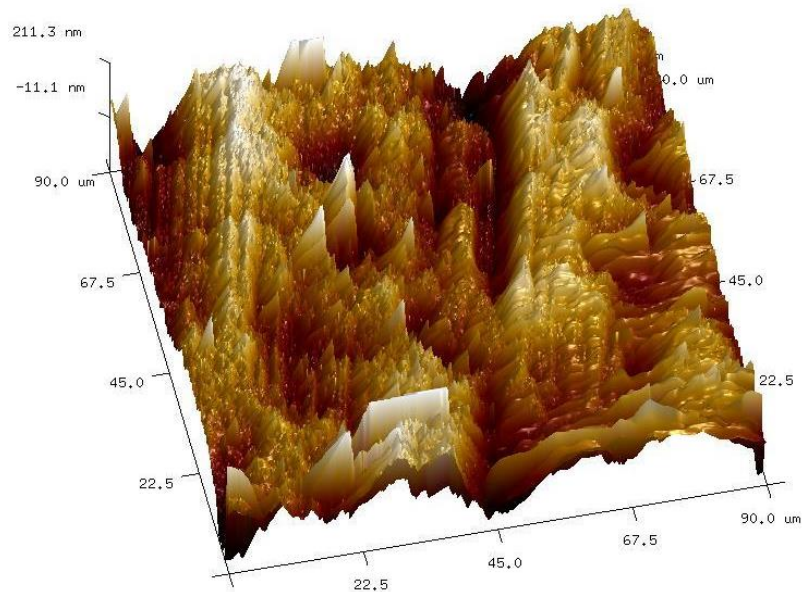


Рисунок 4.24 – Модель 3D структури обробленої поверхні зразка 1

Також було проведено аналіз розподілу висот за параметрами зміни п'єзoeлементу (рис. 4.25).

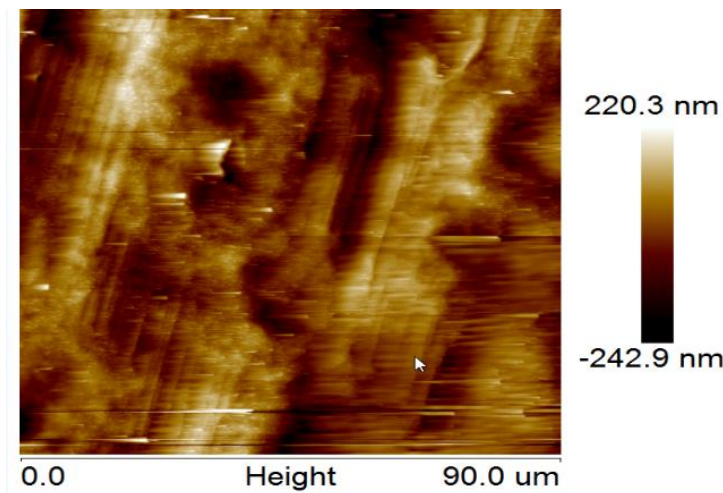


Рисунок 4.25 – Дані про висоту мікрорельєфу в процесі дослідження AFM мікроскопом за параметрами зміни п'єзона напруги Z-елемента для зразка 1

Аналіз даних на рис. 4.22, 4.25 призводить до висновку, що на поверхні довжиною 90 мкм, максимальна висота виступів 211.3 нм (рис. 4.24), максимальне заглиблення становить -233.5 нм.

З рис. 4.24 можна зробити висновок, що на більшій частині обробленої поверхні зразка 1 спостерігається хаотичне розташування висот і западин, що

означає випадковий розподіл нерівностей на поверхні. Це повністю підтверджує раніше отримані результати при дослідженні поверхні п.4.4.

Поверхня після обробки зразка 2 представлена рис. 4.26. Слід зазначити, що у рис. 4.27 можна ідентифікувати структуру обробленого зразка 2 і розподіл місць лазерного впливу у вигляді ліній. Модифікована поверхня має нерівномірний розподіл западин та характеризується неперіодичністю поверхневих структур.

З аналізу розподілу висоти 3D нерівностей на поверхні досліджуваного зразка було встановлено, що їх діапазон знаходиться в межах від -207,8 нм до 213,5 нм (рис. 4.27).

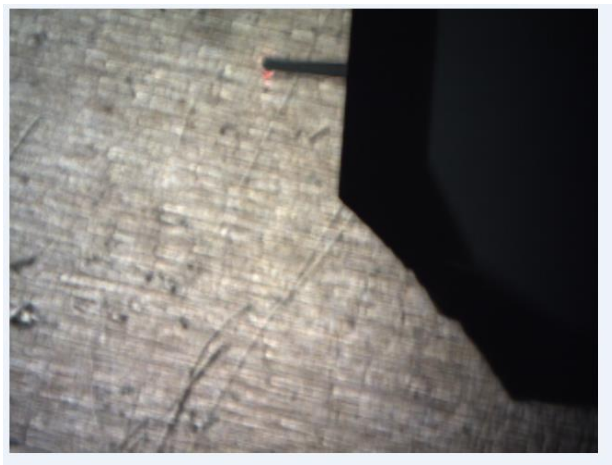


Рисунок 4.26 – Структура поверхні обробленого зразка 2 в момент сканування кантелевером мікроскопа

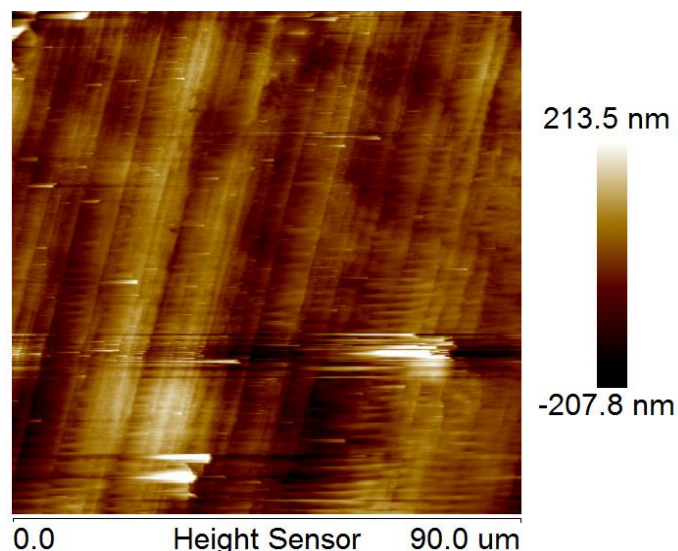


Рисунок 4.27 – Дані про висоту мікрорельєфу поверхні зразка 2 у процесі дослідження АФМ мікроскопом за параметрами зміни п'єзона напруги на голівці із замкнутим контуром (зі зниженням дрейфу та рівня шуму)

Оцінка точності вимірювання 3D нерівностей дослідного зразка 2 не перевищувала діапазон (-12,3...5,8) нм (рис. 4.28). Аналізуючи рисунок можна зробити висновок, що на поверхні довжиною 90 мкм, максимальна похибка вимірювання амплітуди поверхні дорівнює 5,8 нм, мінімальна похибка вимірювання амплітуди поверхні дорівнює -11,3 нм.

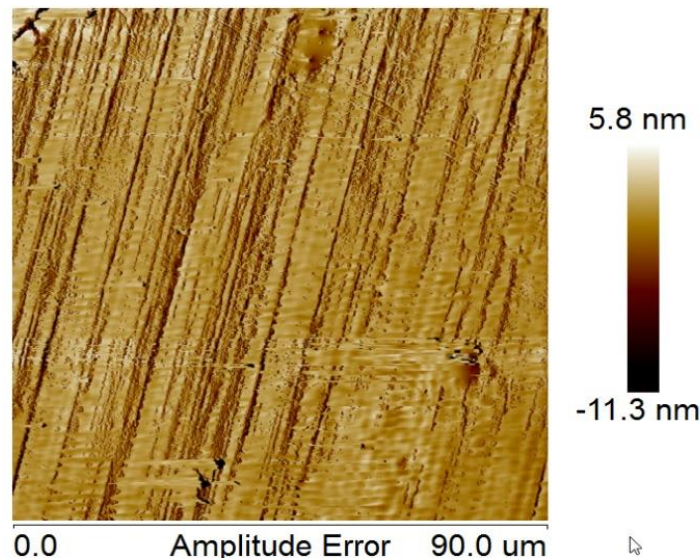


Рисунок 4.28 – Аналіз похибки вимірювання досліджуваного зразка 2

Також були отримані дані фазового зсуву (рис. 4.29) при дослідженні зразка 2 після лазерного опромінення. На рис. 4.29 представлена картина розподілу фізико-хімічних поверхневих змін області розміром 90х90 мкм з урахуванням висоти структурних елементів профілю. З його аналізу можна зробити висновок про рельєф та властивості поверхні. З невеликого (30.2°) значення максимального позитивного зміщення фази на ділянках мікроструктури, відповідних западинам, можна зробити висновок, що випромінювання слабо змінило властивості матеріалу в зонах лазерного впливу, а також відносної гладкості всієї поверхні (рис. 4.30), що підтверджується 3D зображенням структури (рис. 4.31). З помітного рівня зміни (-56.1°) значення мінімального негативного зміщення фази на рельєфних ділянках мікроструктури, можна зробити висновок про помітний кут нахилу ділянок поверхні, який підкреслює наявність лінійних подряпин з великою протяжністю та контрастністю, що також підтверджується 3D зображенням структури (рис. 4.31).

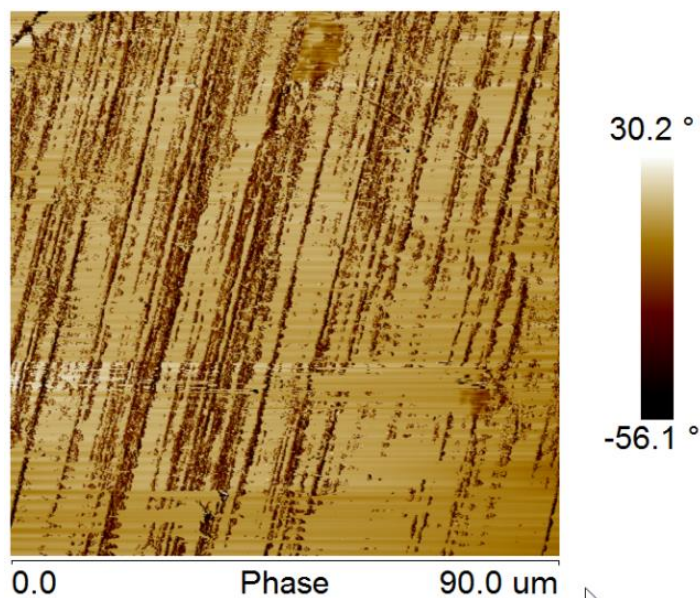


Рисунок 4.29 – Дослідження фазового зміщення сигналу AFM для дослідження зразка 2 після лазерного опромінення

Також було проведено аналіз висоти за параметрами зміни п'єзoeлементa (рис. 4.30), з якого можна зробити висновок, що на поверхні довжиною 90 мкм, максимальна висота 3D профілю дорівнює 213.5 нм (рис. 4.31), максимальне поглиблення відповідає -242.9 нм.

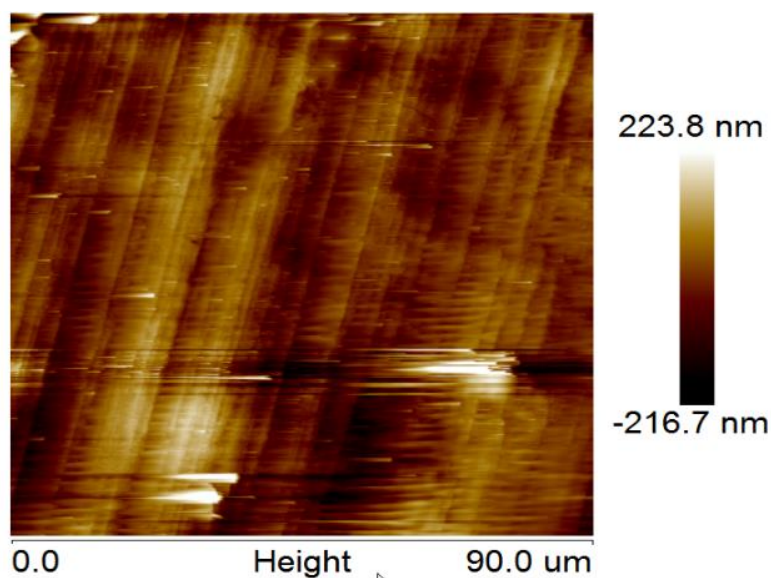


Рисунок 4.30 – Дані про висоту мікрорельєфу в процесі дослідження AFM мікроскопом за параметрами зміни п'єзонапруги Z-елемента для зразка 2

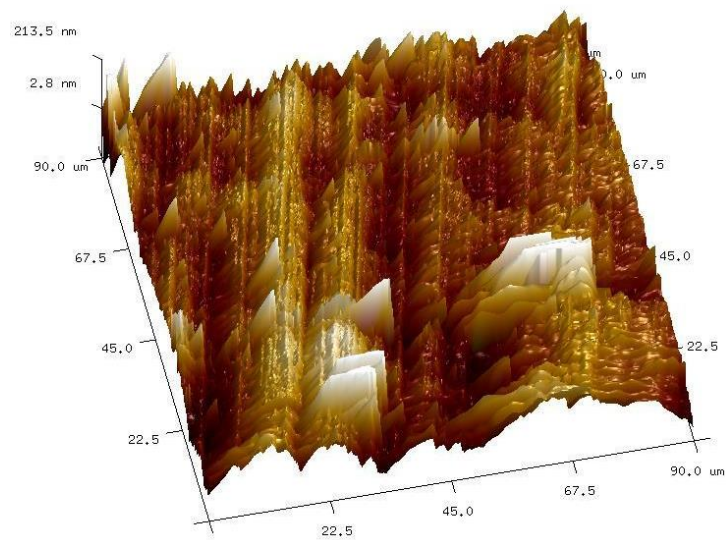


Рисунок 4.31 – Моделювання 3D структури обробленої поверхні зразка 2

Аналіз рис. 4.31 показує, що у переважній частині поверхні спостерігаються перепад висот і западин характерний для квазіперіодичних 3D структур, куди накладається початкове формування лінійних періодичних структур.

Структуру поверхні третього зразка можна побачити на рис. 4.32 і зробити висновок, що точки на поверхні мають перекриття та спостерігається послідовне повторення плями вздовж напрямку руху променя.



Рисунок 4.32 – Структура модифікованої поверхні зразка 3

З аналізу розподілу висоти 3D нерівностей на поверхні досліджуваного зразка встановлено, що діапазон лежить у межах від -2,1 до 2,6 мкм (рис. 4.33).

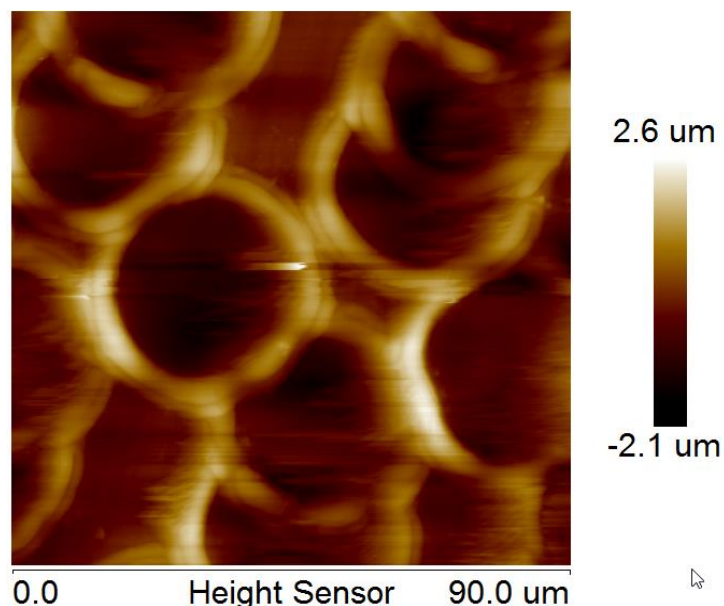


Рисунок 4.33 – Дані про висоту мікрорельєфу зразка 3 у процесі дослідження AFM мікроскопом за параметрами зміни п'єзона напруги на голівці із замкнутим контуром (зі зниженням дрейфу та рівня шуму)

Оцінка точності вимірювання 3D нерівностей дослідного зразка 3 не перевищувала діапазон $(-16,0 \dots 8,9)$ нм (рис. 4.34), звідки можна зробити висновок, що на поверхні довжиною 90 мкм, максимальна похибка вимірювання амплітуди виступів дорівнює 8,9 нм, мінімальна похибка виміру амплітуди западин дорівнює -16,0 нм.

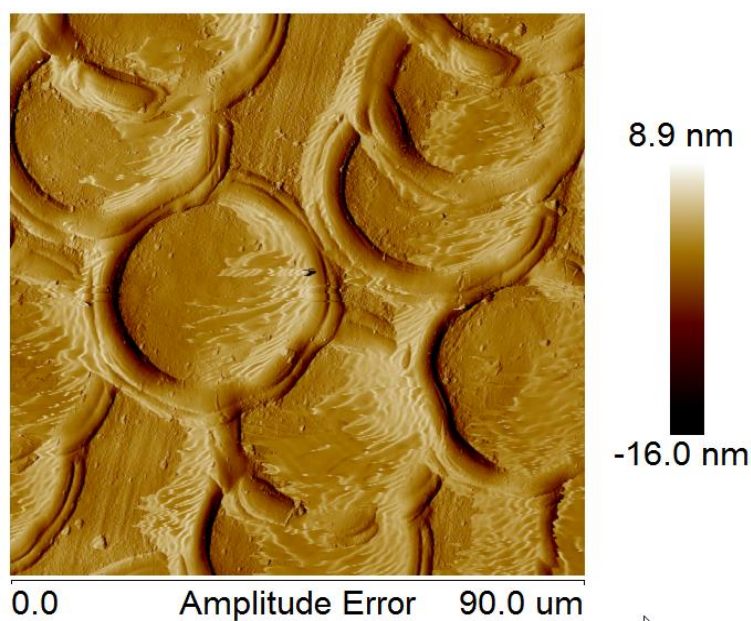


Рисунок 4.34 – Аналіз похибки вимірювання досліджуваного зразка 3

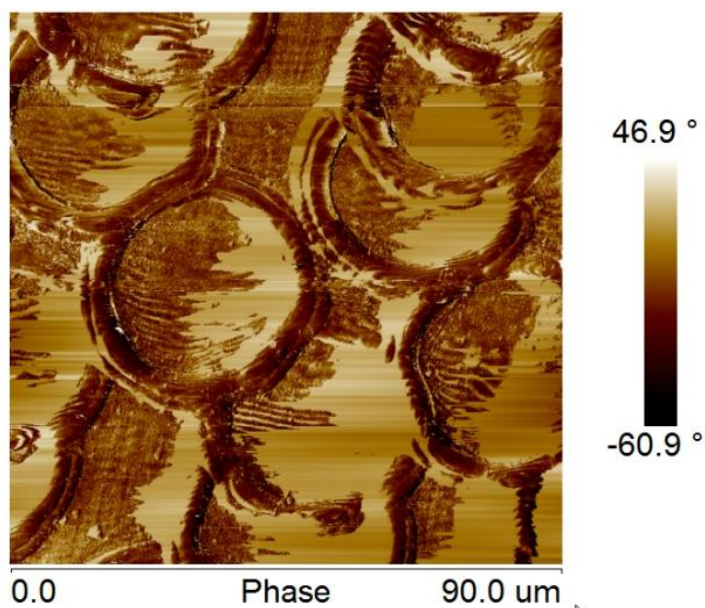


Рисунок 4.35 – Дослідження фазового зміщення сигналу AFM для зразка 3 після лазерного опромінення

З рис. 4.35 можна побачити картину розподілу фізико-хімічних поверхневих змін області розміром 90х90 мкм з урахуванням висоти структурних елементів профілю. З його аналізу можна зробити висновок про рельєф та властивості поверхні. З підвищеного (46.9°) значення максимального позитивного зміщення фази на ділянках мікроструктури, що відповідають западинам, можна відстежувати про наявність ділянок з високою щільністю матеріалу в точках лазерного впливу всередині кратерів, а також відносної гладкості цих ділянок, що підтверджується 3D зображенням структури (рис. 4.36).

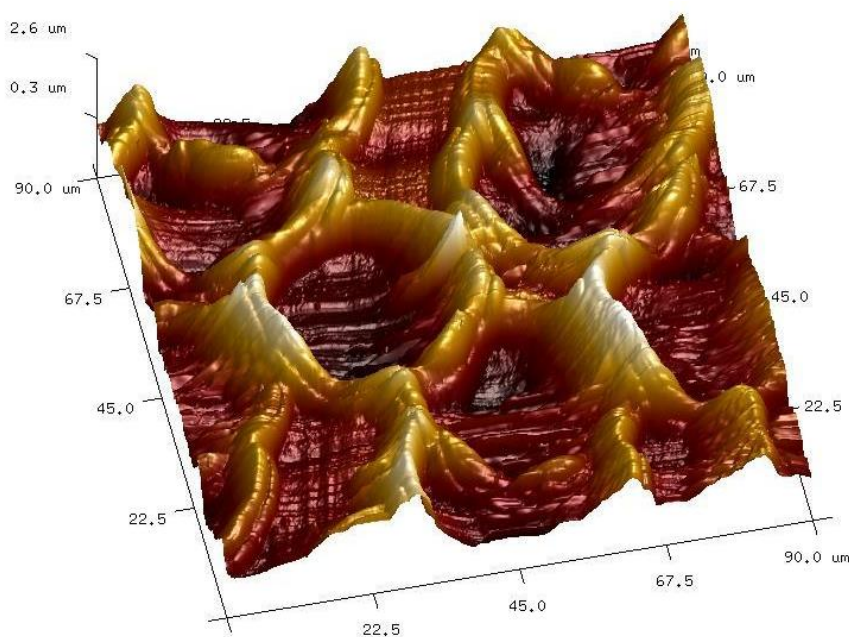


Рисунок 4.36 – Моделювання 3D структури для зразка 3

З низького (-60.9°) значення мінімального негативного зміщення фази на рельєфних ділянках мікроструктури можна зробити висновок про великий кут нахилу ділянок поверхні навколо кратерів, а також про їхню велику протяжність і контрастність, що також підтверджується 3D зображенням структури (рис. 4.36). Також було проведено аналіз висоти за параметрами зміни п'єзоелементу (рис. 4.37).

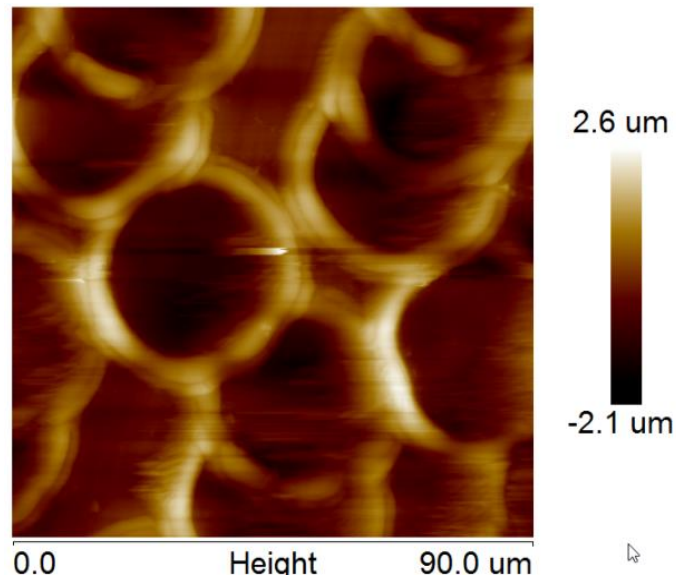


Рисунок 4.37 – Дані про висоту мікрорельєфу зразка 3 у процесі дослідження AFM мікроскопом за параметрами зміни п'єзона напруги Z-елемента

З аналізу рис. 4.33, 4.37 можна зробити висновок, що у поверхні довжиною 90 мкм, максимальна висота 3D профілю дорівнює 2,6 мкм (рис. 4.37), максимальне поглиблення відповідає -2,1 мкм.

Аналіз рис. 4.36 дозволяє укласти, що на поверхні обробленого зразка є квазігармонійний розподіл висот і западин, поверхня близька до періодичної. Можна спостерігати сформовані кільцеподібні мікроструктури, а в їх западинах – ЛИППС наноструктури. Слід зазначити, що на поверхні зразка є сліди плавлення матеріалу, а по краях западин формується перекриття кратерів, що відповідає за формування шорсткості та періодичності на мікрорівні. Крім того, при близькому розташуванні стін сусідніх кратерів можливе формування поверхневих наноструктур поверх 3D мікроструктур (рис. 4.19, зразок 3).

Для зразка 4 було проведено лазерну обробку. Аналіз лазерно-модифікованої поверхні було проведено на AFM мікроскопі Bruker Dimension Icon. Результати наведено на рис. 4.38 – 4.43.

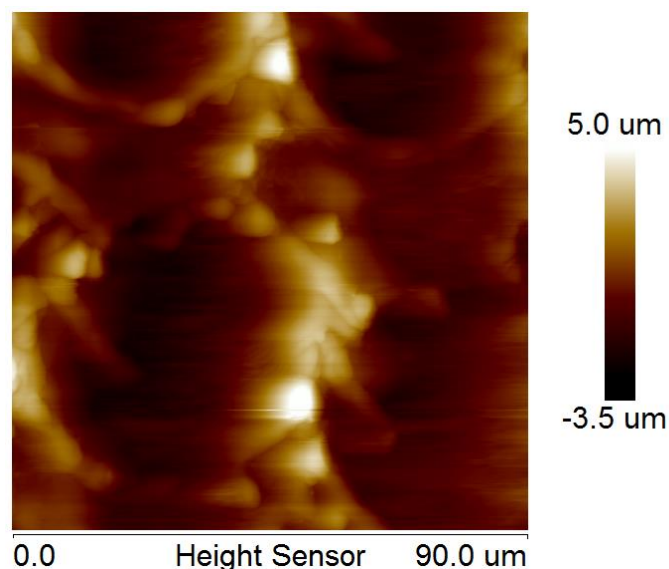


Рисунок 4.38 – Дані про висоту мікрорельєфу в процесі дослідження зразка 4 за параметрами зміни п'єзона напруги на головці із замкнутим контуром (зі зниженням дрейфу та рівня шуму)

З аналізу розподілу висоти 3D нерівностей на поверхні зразка досліджуваного встановили, що їх діапазон лежить в межах від -3,5 до 5,0 мкм (рис. 4.38).

Для зразка 4 на поверхні розміром 90х90 мкм, максимальна похибка вимірювання амплітуди поверхні дорівнює 11,3 нм, мінімальна похибка вимірювання амплітуди поверхні дорівнює -21,9 нм, рис. 4.39.

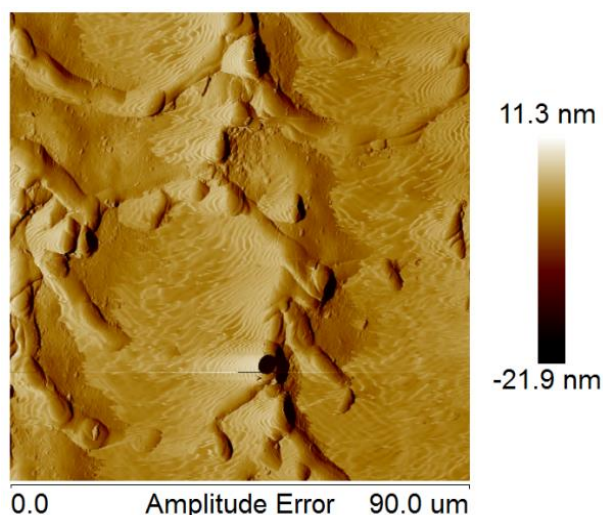


Рисунок 4.39 – Аналіз похибки вимірювання для дослідженого зразка 4

Також були отримані дані фазового зсуву при дослідженні зразка після лазерного опромінення, які представлені на рис. 4.40.

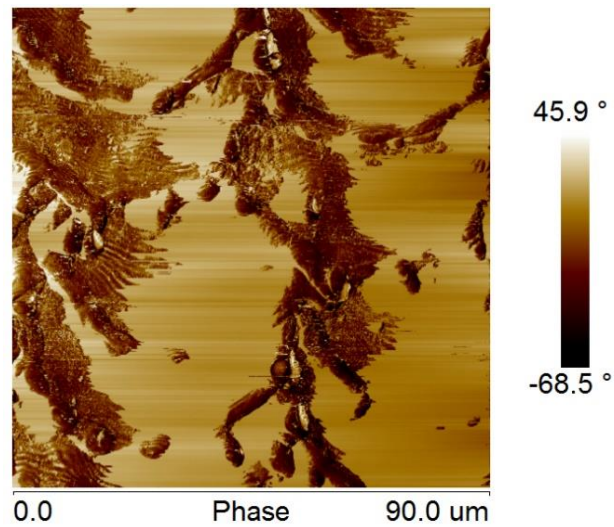


Рисунок 4.40 – Дослідження зміщення фазового сигналу АФМ для дослідження зразка 4 після лазерного опромінення

На рис. 4.40 можна бачити картину розподілу фізико-хімічних поверхневих змін області розміром 90х90 мкм з урахуванням висоти структурних елементів профілю. З його аналізу можна зробити висновок, що рельєф та властивості поверхні корелюють з характеристиками, отриманими при аналізі зразка 3. За наявності підвищеного (45.9°) значення максимального позитивного зміщення фази на ділянках мікроструктури, що відповідають западинам, а також дуже низького (-68.5°) значення мінімального негативного зміщення фази на рельєфних ділянках мікроструктури, можна зробити висновок про велику схожість цих структур на мікрорівні, при деяких відмінностях у їх макроструктурній організації. Це добре підтверджує 3D зображення структур – рис. 4.36 та рис. 4.41.

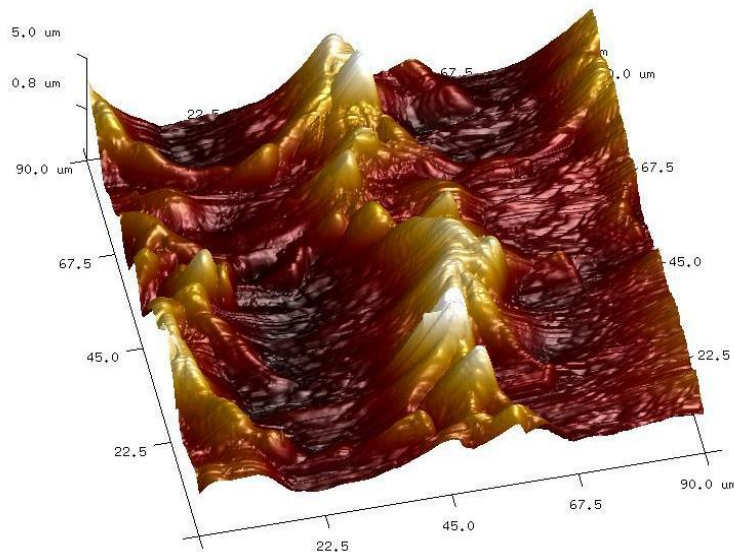


Рисунок 4.41 – Моделювання 3D структури поверхні зразка 4

Також було проведено аналіз висоти за параметрами зміни п'єзоелементу (рис. 4.42).

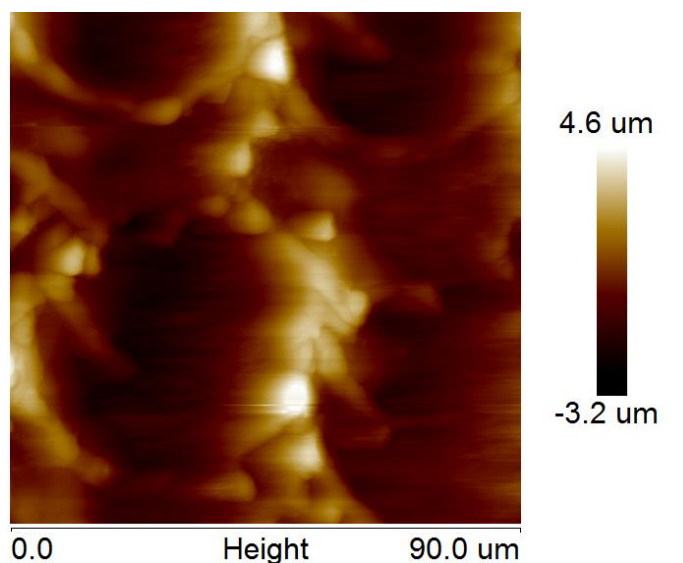


Рисунок 4.42 – Дані про висоту мікрорельєфу зразка 4 за параметрами зміни п'єзона напруги Z-елемента

З рис. 4.38 і рис. 4.42 можна зробити висновок, що на поверхні розміром 90х90 мкм, максимальна висота поверхні відповідає 4.6 мкм, максимальне поглиблення западини відповідає -3.2 мкм.

Аналізуючи картину розподілу шорсткості на рис. 4.42 можна зробити висновок, що зразка 4 має місце гармонійне розподіл висот і западин по всій структурі матеріалу. Поверхня характеризується наявністю ЛППС мікро- та наноструктур. Аналіз сканованого зображення обробленого зразка 4 дозволив визначити наявність періодичних мікроструктур, що мають лінійний характер і знаходяться вздовж лінії сканування лазером. Цей результат збігається з результатами дослідження шорсткості за допомогою цифрового оптичного мікроскопа (рис. 4.19). Також було виявлено наявність періодичних наноструктур, які розташовані в кратерах плям обробки. Однак слід зазначити, що наявні наноструктури мають менш виражений характер порівняно із структурами, сформованими на поверхні зразка 3, що пояснюється накладенням плям від лазерного променя.

Інтегральні результати досліджень шорсткості зразків на позиціях 1-4 методом AFM представлені у табл. 4.10 та рис. 4.43.

Таблиця 4.10 - Результати досліджень шорсткості оброблених зразків 1-4 методом AFM

Зразок	R_q , нм	R_a , нм
1	63	49,5
2	59	43,7
3	719	588
4	1210	958

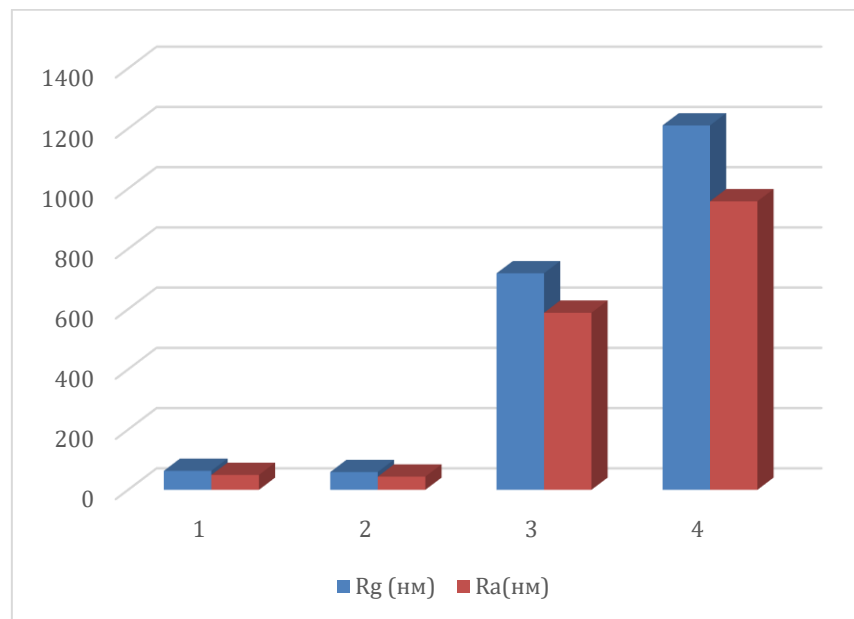


Рисунок 4.43 – Порівняння шорсткості досліджуваних зразків 1-4

Слід відзначити, що зі зміною інтенсивності лазерної обробки відбувається не лише зміна шорсткості. Внаслідок швидкоплинних термічних процесів можлива зміна інших фізико-хімічних властивостей, зокрема такого параметра як поверхнева твердість [93, 98-101].

4.6 Дослідження твердості поверхні зразків із сталі AISI 321 після наносекундної лазерної обробки

Дослідження твердості проводилося з використанням методу Віккерса, що регламентується ISO 6507. Це один із статичних способів дослідження твердості. Принцип роботи методу визначення твердості за Віккерсом заснований на дослідженні залежності глибини проникнення алмазного конуса (індентора) в

матеріал, що визначається величиною зусилля. Після зняття навантаження на поверхні зразка залишається відбиток, відповідної глибини занурення індентора.

У стандарті ISO 6507 у методі випробування за Віккерсом регламентовані мінімальні відстані між точками випробування (відбитками) та кромкою зразка. Підставою для цих мінімальних відстаней є необхідність запобігання викривленням результатів, що виникають внаслідок деформації структури матеріалу.

Метод визначення твердості за Віккерсом має такі переваги: за допомогою цього методу можна вимірювати твердість практично будь-яких матеріалів та заготовок, метод охоплює весь діапазон твердості. Саме випробування неруйнівне та зразок можна використовувати далі. З іншого боку, у методі Віккерса необхідно мати якісну структуру поверхні зразка тому, що вимір відбитка проводиться візуально. Це означає необхідність підготовки точки випробування на зразку. Повільне проведення випробувань від 30 до 60 секунд, причому тут не враховується час підготовки зразків. Через необхідність візуального аналізу відбитка твердомір Віккерса має бути обладнаний відповідною оптикою.

Твердість поверхневого шару після лазерного сканування досліджували на універсальній машині – твердомірі за Віккерсом фірми Zwick Roell, рис. 4.45, що базується на технологіях, які використовують інноваційні мехатронні компоненти.



Рисунок 4.45 – Твердомір з Віккерсу фірми Zwick Roell

Випробування відповідають чинним промисловим стандартам: ISO 6506, ISO 6507, ISO 4545, ASTM E384, ASTM E92, ASTM E10. У табл. 4.10 наведено основні параметри твердоміра. Твердомір відноситься до машин для визначення твердості по Віккерсу з програмним забезпеченням та замкнутим контуром регулювання. Твердоміри за Віккерсом із системою зміни інструментів (револьверна головка), дозволяють швидко змінювати різні випробувальні методики.

Твердомір пропонує такі функції: шаблони, тримачі зразка, система камер з високою роздільною здатністю та додаток навантаження з електронним керуванням. За допомогою твердоміра можна також складати профільні проходження та карти твердості цілих зразків. Завдяки функціям експорту можна складати звіти або експортувати дані в існуючі системи за допомогою інтерфейсу. Як індентор твердомір використовує піраміду з промислового алмазу з кутом 136° . Піраміда вдавлюється у матеріал із певним зусиллям. Величина відбитка та його діагоналі вимірюються оптичною системою. Автоматичне проведення вимірювань дозволило уникнути похибки вимірювання та отримати точний результат визначення твердості. У табл. 4.11 наведено основні характеристики твердоміра фірми Zwick Roell.

Таблиця 4.11 – Основні характеристики твердоміра ZwickRoell

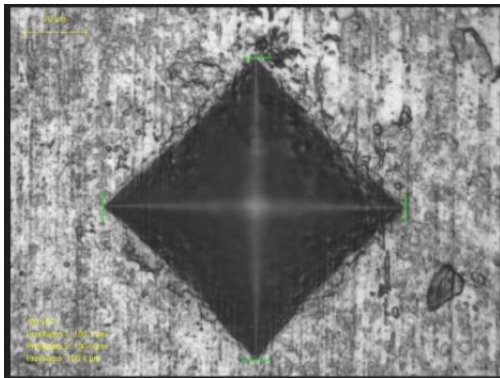
Характеристика	Параметр
Діапазон навантаження	0,00025 - 62,5 кг
Вимірювальна револьверна головка	Механізована
Індикація	ПК з монітором
Ступінь автоматизації	Повністю автоматична
Програмне забезпечення	ecos Workflow Pro
Компонент позиціонування	Стіл із лінійним переміщенням

У табл. 4.12 представлений протокол вимірювання твердості за Віккерсом п'яти досліджуваних зразків після лазерної обробки.

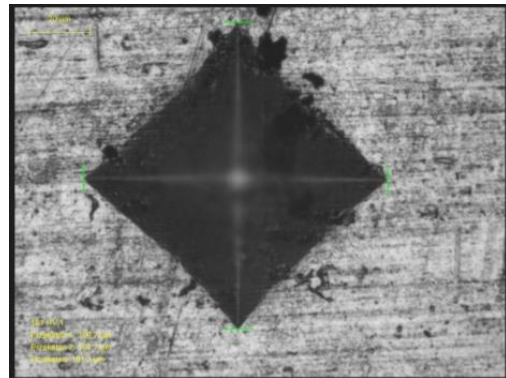
На рис. 4.46 показані мікроструктури поверхневого шару зразків 1-4 після різної енергетичної дії наносекундної лазерної обробки з результатами аналізу твердості. Слід зазначити, що внаслідок лазерного опромінення на поверхні зразка утворюється зона термічної дії, структурні та фазові перетворення в якій призводять до формування різних за своїми властивостями шарів.

Таблиця 4.12 – Протокол автоматизованого виміру твердості зразків 1-5 відповідно

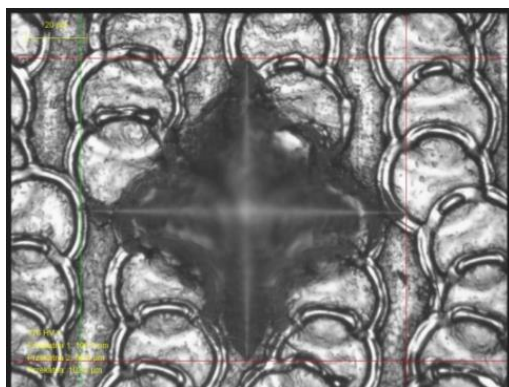
Зразок	Твердість, HV	Метод	Діагональ
1	184	HV 1	100,410
2	181	HV 1	101,296
3	176	HV 1	102,584
4	219	HV 1	92,027
«База»	186	HV 1	99,924



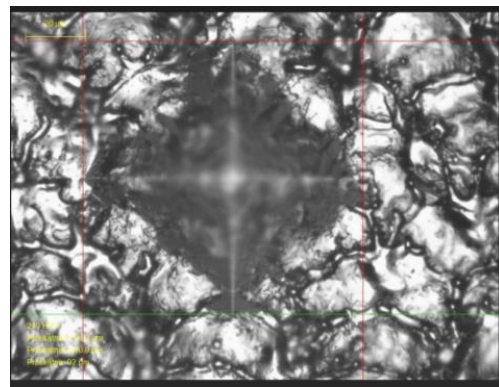
1



2



3



4

Рисунок 4.46 – Вимірювання твердості для зразків 1-4

На рис. 4.46, 1 видно, що в умовах низької потужності (7,5 Вт) спостерігається поверхнева структура, що має в більшості випадковий характер і мало відрізняється від базової поверхні. Однак за результатами вимірювань було визначено, що твердість зразка 1 дорівнює 184 HV, що дещо менше за твердість зразка «база» (табл. 4.10). Це можна пояснити тим, що з-за малого енергетичного впливу імпульсної лазерної обробки в поверхневому шарі відбулися незначні зміни мікроструктури. Це характеризується незначним зниженням твердості в зоні термічного впливу внаслідок часткової десталізації

аустеніту та одночасної стабілізації аустенітної фази за рахунок наявності Ni у хімічному складі. Цей факт, ймовірно, також є результатом того, що через низьку потужність лазера і, відповідно, недостатню температуру для значного зменшення стійкості аустенітних структур, відбувається зниження вмісту вуглецю в обробленому шарі.

Твердість зразка 2 (рис. 4.46, 2) також зменшилася до 181 HV. Тут важливо відзначити, що поверхнева структура вже має характеристику, що відповідає симбіозу періодичних та випадкових структур. Аналіз мікроструктури зразка 2 показав наявність початкової фази створення періодичних структур за рахунок розплавлення тонкого поверхневого шару матеріалу. Подальше зменшення твердості може бути пояснено збільшенням потужності обробки і відповідно збільшенням температури в зоні опромінення, що, у свою чергу, впливає на розподіл вуглецю в поверхневому шарі матеріалу.

Аналіз ділянки вдавлювання індентора для зразка 3 дозволив визначити наявність візуалізованих періодичних структур (рис. 4.45, 3). На цій ділянці відзначається подальше зменшення твердості поверхневої обробленого матеріалу до 176 HV. Причини зниження поверхневої твердості зразків 1-3 при підвищенні потужності обробки та температури в зоні опромінення, можливо пояснюється тим, що при традиційній термічній обробці аустенітні сталі, до яких відноситься і AISI 321, не піддаються загартування, а навпаки, зі збільшенням температури обробки ще більше пом'якшуються. Тому для аустенітних нержавіючих сталей теплова обробка є пом'якшувальною термічною операцією, що супроводжується вивільненням не осаженого вуглецю.

Аналіз результатів дослідження зразка 4 (рис. 4.45, 4) показав, що на відміну зразків 1-3 ця поверхня мають місце значні структурні зміни, що характеризуються більш розвиненою поверхнею і збільшеною твердістю дослідного зразка. Слід зазначити, що зі збільшенням потужності лазерної обробки збільшуються глибина і ширина зони зміцнення. Збільшення потужності до 15 Вт за інших рівних умов обробки призводить до температурного впливу, при якому можливе створення базових структур з вмістом карбідів Ti, Cr і оксидів металів. Це стає причиною збільшення твердості поверхневого шару матеріалу. Важливо, що за таких умов обробки (збільшення потужності лазера, збільшення температури опромінення) у поверхневому шарі відбуваються структурні зміни, що характеризуються частковим перетворенням аустеніту на мартенсит з високою твердістю. Підвищення твердості обумовлено симбіозом цих двох процесів (створенням мартенситу, карбідів і оксидів металів), тобто реалізується процес лазерного загартування або наклепу. При цьому слід зазначити, що механізм лазерного гарту принципово відрізняється від

механізму наклепу поверхні аустенітної нержавіючої сталі, що реалізується при холодному пластичному деформуванні.

4.7 Метод аналізу та контролю мікрорельєфу поверхні шляхом відображення ковзного лазерного променя

4.7.1 Загальна постановка експериментів з контролю мікрорельєфу та розсіювання випромінювання гелій-неонового лазера на поверхні зразків

Лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури (ЛППС) відіграють роль у процесі надання виробам гідрофільних та гідрофобних властивостей, фрикційних властивостей для підвищення міцності у процесі з'єднання шарів багат шарових металокерамічних конструкцій. Для контролю при виробництві деталей потрібен простий, дешевий та доступний спосіб, що дозволяє оперативно контролювати властивості 3D поверхні після обробки. Це можна реалізувати використання різного виду мікроскопів, зокрема й електронної мікроскопії. Головна перешкода тут – це висока вартість обладнання та складності для оперативного застосування. З іншого боку своє широке застосування знаходять методи визначення мікроструктури поверхні, засновані на непрямих оцінках, наприклад, проекції відбитого ковзного променя гелій-неонового лазера [99, 100, 102].

Саме такий спосіб був використаний в оцінці властивостей поверхні 3D після обробки для зразків досліджених раніше в попередніх розділах. Для цього було використано експериментальну установку, представлену на рис. 4.47, 4.48.

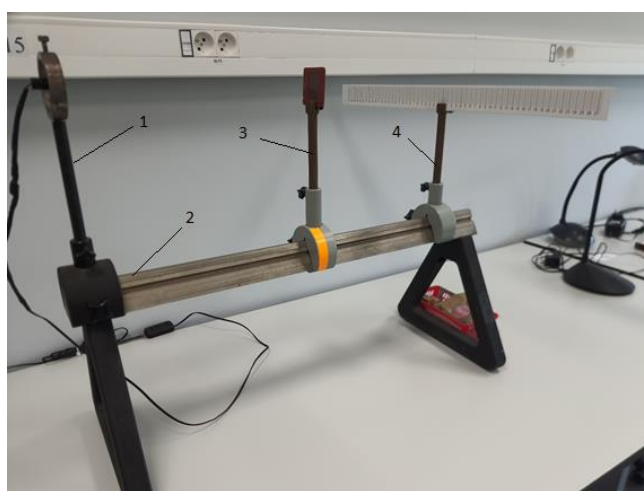


Рисунок 4.47 – Загальний вигляд експериментальної установки: 1 – стійка з гелій-неоновим лазером; 2 – напрямна рейка; 3 – стійка із дослідним зразком; 4 – стійка з мірною лінійкою



Рисунок 4.48 – Загальний вигляд процесу експериментального дослідження розсіювання випромінювання гелій-неонового лазера

У ході експерименту досліджуваний зразок пересувався прямою на відстань 15-20 см і орієнтувався перпендикулярно площині мірної лінійки за рахунок її повороту. Кут падіння лазерного променя змінювався за рахунок повороту стійки з дослідним зразком у діапазоні $7-10^\circ$ і корелювався з поворотом лінійки. Зразки 1-4 вивчали при двох положеннях установки: вздовж напрямку сканування наносекундним лазером (X -напрямок) і поперек нього (Y -напрямок). Ці налаштування змінювалися з метою отримання чіткішого зображення картини розсіювання.

Відповідно до плану експерименту дослідження почалося з обробки зразка «База». При зміні положення зразка стали вздовж осі Y картина розсіювання суттєво змінюється. Дзеркальна складова змінює свій основний напрямок розсіювання на кругове. У центрі спостерігається ромбоподібна яскрава пляма, що свідчить про те, що розсіювання в цій центральній області слабо залежить від орієнтації зразка, рис. 4.49.

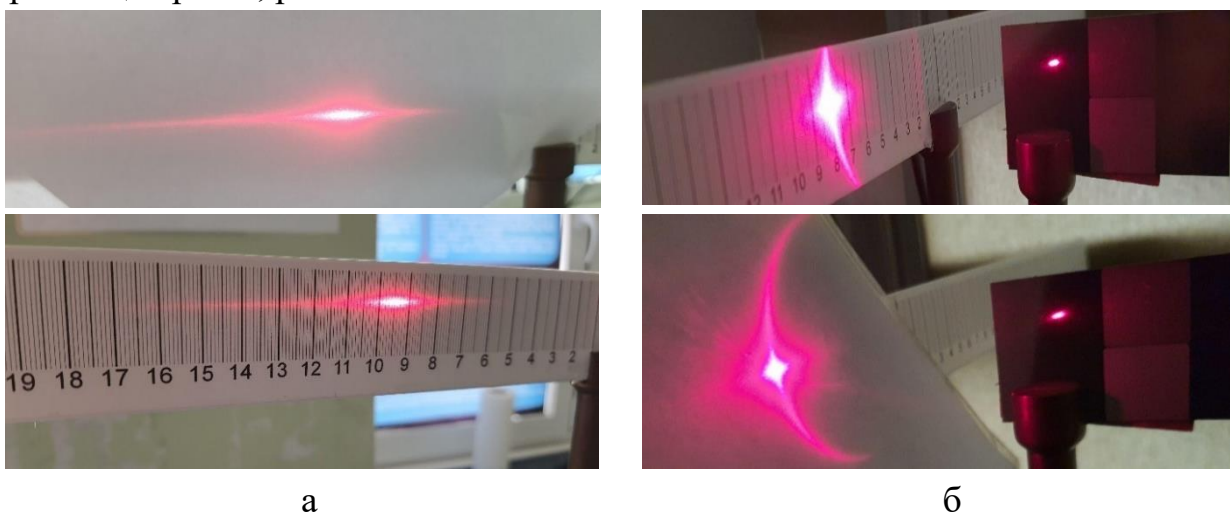


Рисунок 4.49 – Аналіз розсіювання лазерного світла на поверхні зразка «База»: а – встановлення зразка вздовж X -напрямку сканування поверхонь; б – установка зразка вздовж Y -напрямку

Відмінність у картинах загального розподілу розсіювання базової поверхні від її орієнтації можна пояснити наявністю ліній прокатки на поверхні сталі під час її виготовлення. Це підтверджується результатами залежності шорсткості поверхні в напрямку її виміру.

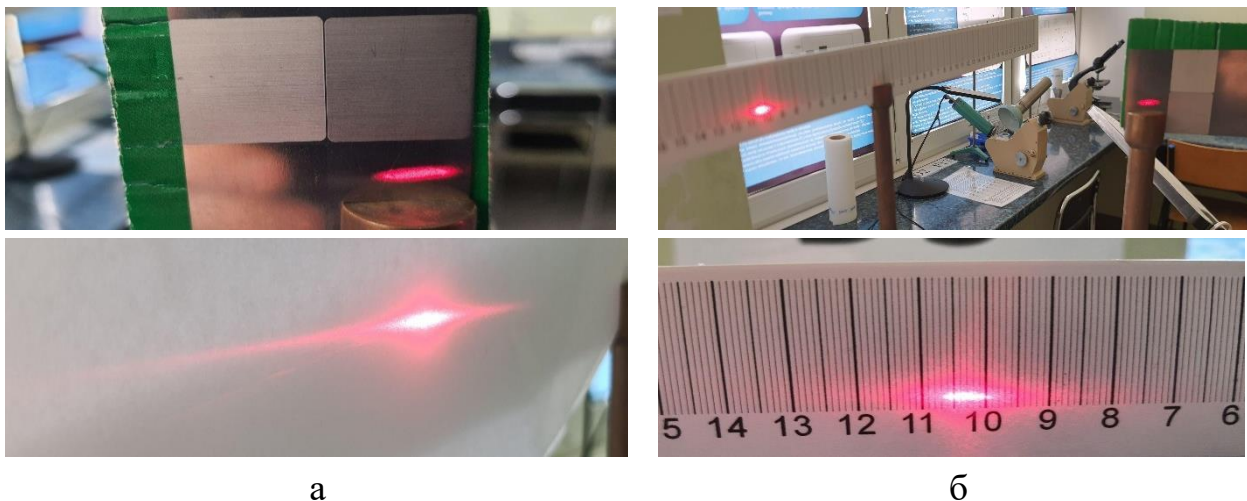


Рисунок 4.50 – Аналіз розсіювання лазерного світла на поверхні зразка 1:
а – встановлення зразка вздовж X -напрямку сканування поверхонь; б –
установка зразка вздовж Y -напрямку

4.7.2 Дослідження та аналіз розсіювання випромінювання гелій-неонового лазера на поверхні зразків 1-4 з періодичними та ймовірними 3D структурами шорсткості

Аналіз розсіювання світла, відбитого від модифікованої поверхні зразка 1 надано на рис. 4.50. Як можна побачити немає важливих відмінностей від зображень для зразка «База». Проте інтенсивність дзеркальної складової зменшилася, що пов'язано з початковим етапом модифікації поверхні при опроміненні її наносекундним лазером. Поява маловисотних ЛППС структур спостерігається на діаграмі у хвості правого розподілу дисперсії висот (рис. 4.51).

У цілому розподіл висот відповідає класичному нормальному розподілу з математичним очікуванням рівним нулю. Дисперсія знаходиться у межах -0.95 до 1.05. Параметри шорсткості, що характеризують 3D шорсткість, набувають таких значень: $Ssk = 0,222$ мкм, $Sku = 3,59$ мкм, $Sdg = 0,038$ мкм, $Sdr = 0,074\%$. Слід зазначити, що параметр $Sku > 3$ і це свідчить, що 3D структури мають гострі

піки. Збільшення загальної площі поверхні $S_{dr} = 0,074\%$, хоча присутність дзеркальної складової у картині розсіювання досить велика.

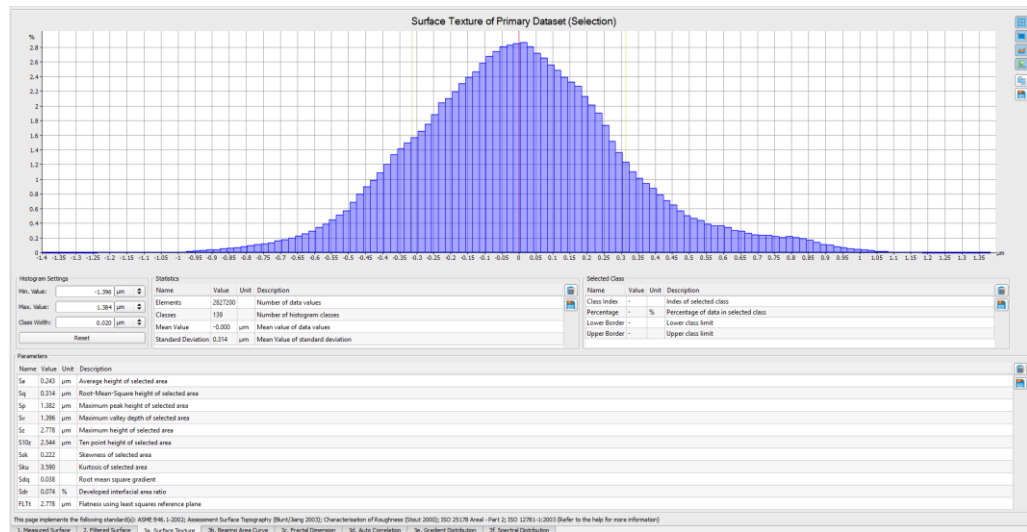


Рисунок 4.51 – Діаграма розподілу висот поверхнею зразка та параметри 3D шорсткості

Аналіз розсіювання світла, відбитого від модифікованої поверхні для зразка 2 надано на рис. 4.52. Картина розсіювання поверхні зразка 2 істотно відрізняється від розсіювання на поверхні зразка 1. Тут можна побачити, що умовно на картину розсіювання зразка 1, накладається інтерференційна картина розсіювання на періодичних структурах, які, як відомо з попередніх досліджень, вже ідентифікуються іншими методами. Розсіювання вздовж ліній сканування має точкову структуру з поперечними лініями, а в поперечному напрямку чергуються поздовжні лінії.



а

б

Рисунок 4.52 – Аналіз розсіювання лазерного світла на поверхні зразка 2:

а – установка зразка вздовж X-напрямку сканування поверхонь;

б - установка зразка вздовж Y-напрямку

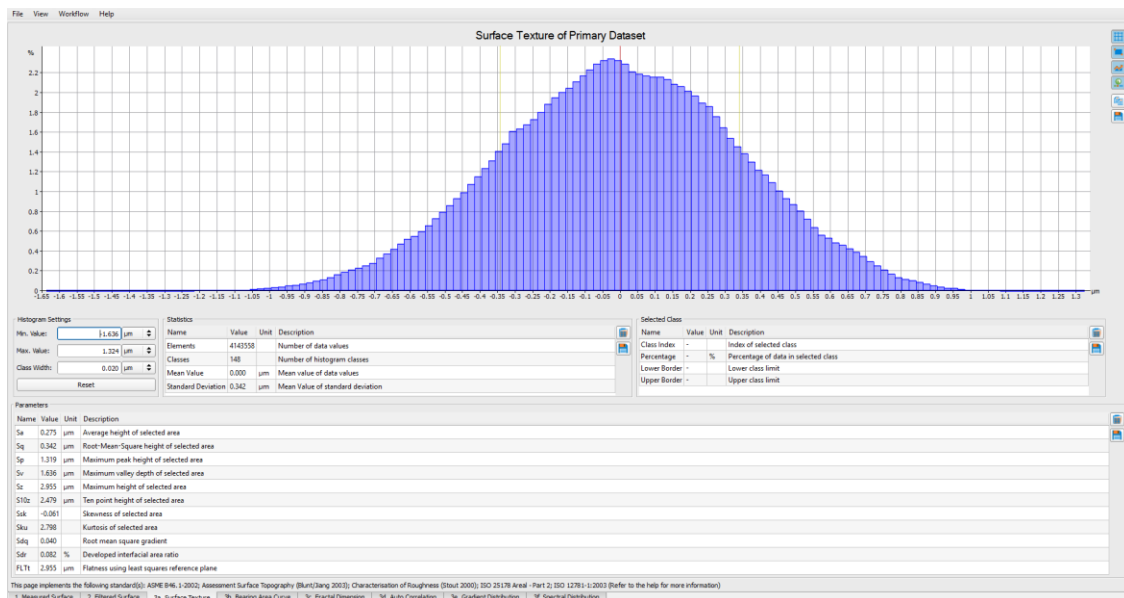


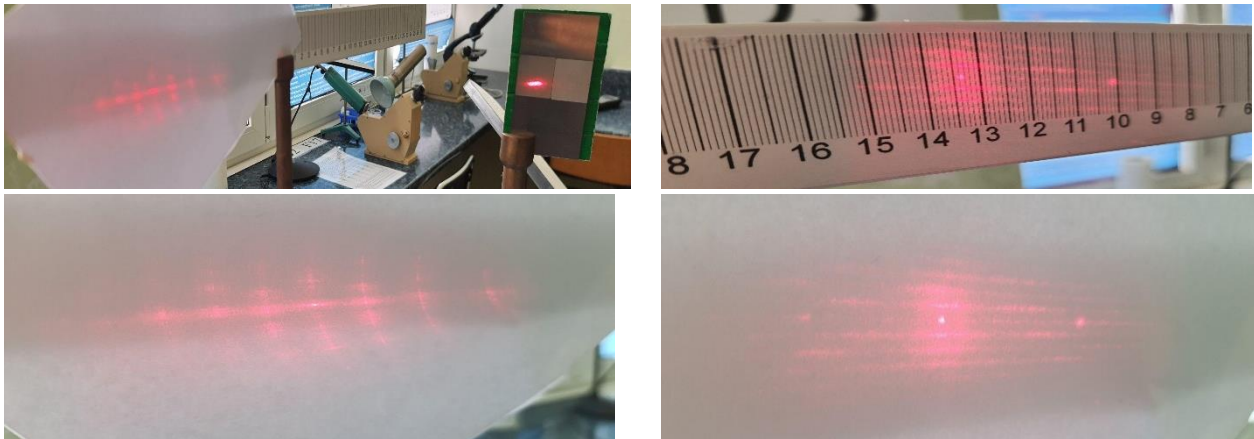
Рисунок 4.53 – Діаграма розподілу висот поверхню зразка 2 та параметри 3D шорсткості

Розподіл висот на діаграмі шорсткості, представленої на рис. 4.53, має суттєві відмінності від діаграми для зразка 1. Дисперсія знаходиться в межах від -1.05 до 0.955, але математичне очікування вже не дорівнює нулю. Права частина розподілу має суттєві відмінності від нормального розподілу. На поверхні можлива присутність щонайменше двох рівнів висот. Параметри, що характеризують 3D шорсткість: $Ssk = -0,061$ мкм, $Sku = 2,798$ мкм, $Sdg = 0,040$ мкм, $Sdr = 0,082\%$.

Слід зазначити, що зразка 2 параметр $Sku < 3$. Це свідчить у тому, що 3D структури, очевидно, мають закруглення вершин, тобто. спостерігається ефект полірування поверхні наносекундним лазерним опроміненням. Збільшення загальної площі поверхні Sdr більше, ніж 1, але ще незначне – $Sdr = 0,082\%$. Ступінь відхилення шорсткості $Ssk = -0,061$ мкм свідчить, що більшість її знаходиться вище середньої лінії профілю. Частка дзеркальної складової у загальному розсіюванні залишається досить високою.

Розсіювання світла, відбитого від модифікованої поверхні зразка 3, представлено на рис. 4.54. Аналізуючи отримані результати можна чітко бачити відсутність дзеркальної складової. Падаюче лазерне світло розсіюється зі створенням чітких інтерференційних картин. Точково-кругова модель розсіювання реалізується у напрямі ліній сканування поверхні, а лінійна модель – поперек ліній сканування. Таким чином, має місце кореляція розсіювання поверхні зразка 3 з розсіюванням на поверхні зразка 2 але інтерференційні закономірності більш чітко виражені. Параметри, що характеризують 3D

шорсткість, мають такі показники: $Ssk = -0,050$ мкм, $Sku = 2,889$ мкм, $Sdg = 0,089$ мкм, $Sdr = 0,397\%$.



а

б

Рисунок 4.54 – Аналіз розсіювання лазерного світла на поверхні зразка 3:

а – установка зразка вздовж X -напрямку сканування поверхонь;

б - установка зразка вздовж Y -напрямку

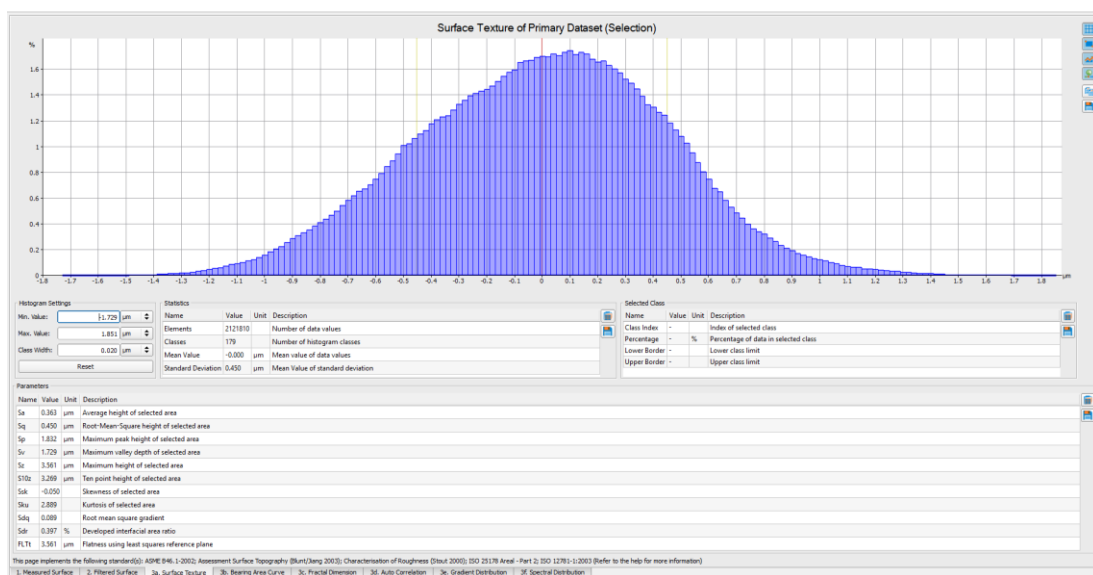


Рисунок 4.55 – Діаграма розподілу висот на поверхні зразка 3 та параметри 3D шорсткості

Діаграма розподілу висот для зразка 3 має особливості. Дисперсія розподілу частот значно зросла від $-1,7$ до $+1,45$. Математичне очікування має суттєве зміщення у позитивну область. Градієнт швидкості зміни западин значно менше його значення в області вершин (праворуч), рис. 4.55.

Слід зазначити, що параметр $Sku < 3$. Це свідчить, що 3D структури мають закруглення. Площа поверхні значно збільшилася до $Sdr = 0,3972\%$. Ступінь

відхилення шорсткості $S_{sk} = -0,050$ мкм, що свідчить про те, що більшість її знаходиться вище середньої лінії профілю. Головна відмінність у тому, що дзеркальна складова у загальному розсіюванні відсутня, тобто реалізується варіант повного розсіювання червоного променя гелій-неонового лазера із чітким збереженням інтерференційних структур.

Аналіз розсіювання світла, відбитого від модифікованої поверхні зразка 4, представлений на рис. 4.56 – 4.58.

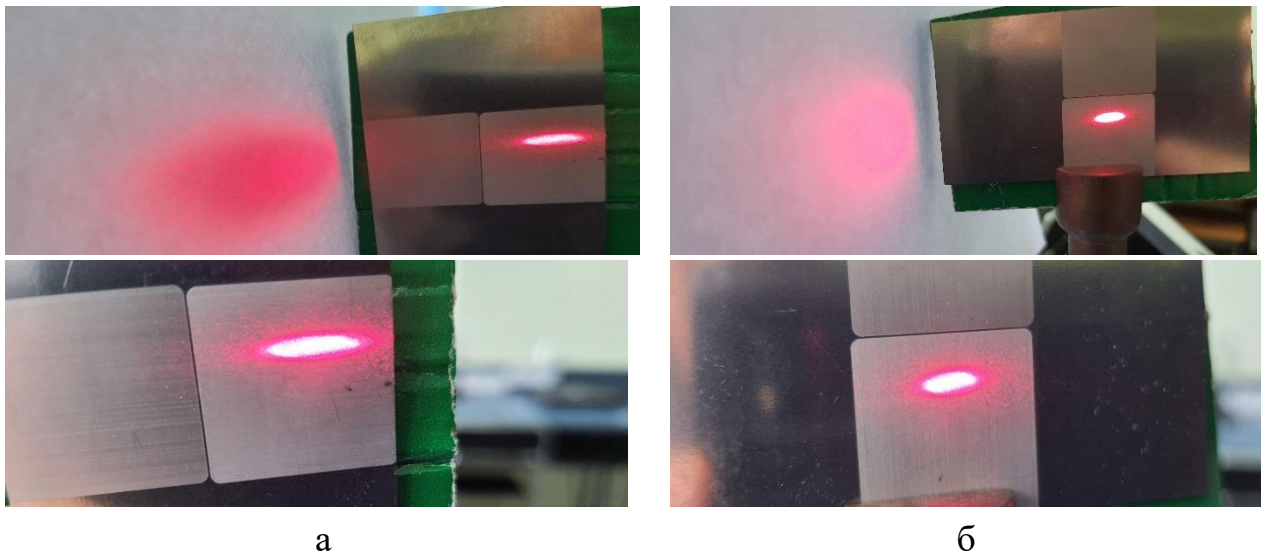


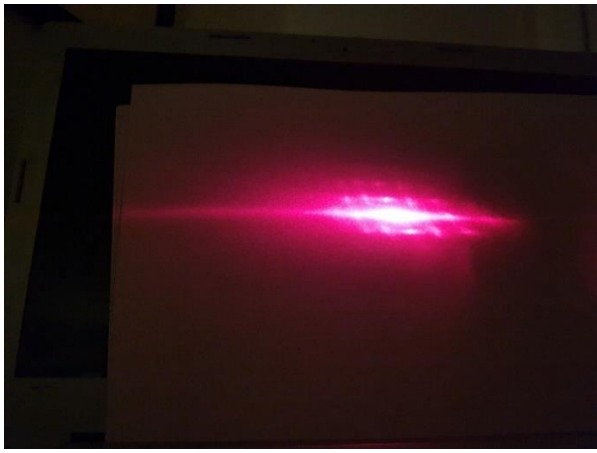
Рисунок 4.56 – Аналіз розсіювання лазерного світла на поверхні зразка 4:
а – установка зразка вздовж X -напрямку сканування поверхонь;
б - установка зразка вздовж Y -напрямку

Розсіювання на поверхні зразка 4 істотно відрізняється від розглянутого раніше зразків 1-3. По-перше, розсіювання настільки сильне, що на мірній лінійці можна побачити лише зовсім слабкий рожевий розгалужений колір, який практично неможливо ідентифікувати. При наближенні паперового екрана впритул до зразка фіксуються великі плями розсіювання (рис. 4.56, а, б). І тільки при повній темряві (рис. 4.57) на малій відстані можна ідентифікувати наявність інтерференційних структур, кілька схожих на вигляд структурам, характерним для зразка 2, рис. 4.58.

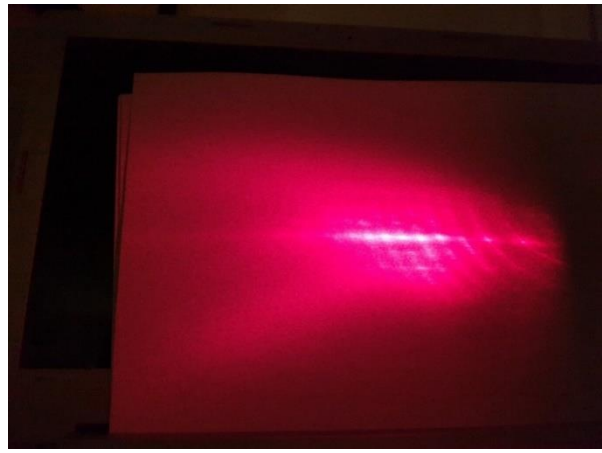
Параметри характеризують 3D шорсткість приймають такі значення: $S_{sk} = 0,423$ мкм, $S_{ku} = 2,640$ мкм, $S_{dg} = 0,224$ мкм, $S_{dr} = 2,467$ %.

Діаграма розподілу висот має особливості, рис. 4.59. Дисперсія розподілу частот значно зросла від $-3,1$ до $+5,1$. Математичне очікування має суттєве зміщення до області негативних значень.

Слід зазначити, що параметр $S_{ku} < 3$. Це свідчить про закруглення 3D структур. Збільшення загальної площі поверхні значно зросло до $S_{dr} = 2,467\%$.



а



б

Рисунок 4.57 – Аналіз розсіювання лазерного світла на поверхні досліджуваного зразка 4 у темряві: а – встановлення зразка вздовж X -напрямку сканування поверхні при наносекундній лазерній обробці; б - установка зразка вздовж Y -напрямку сканування

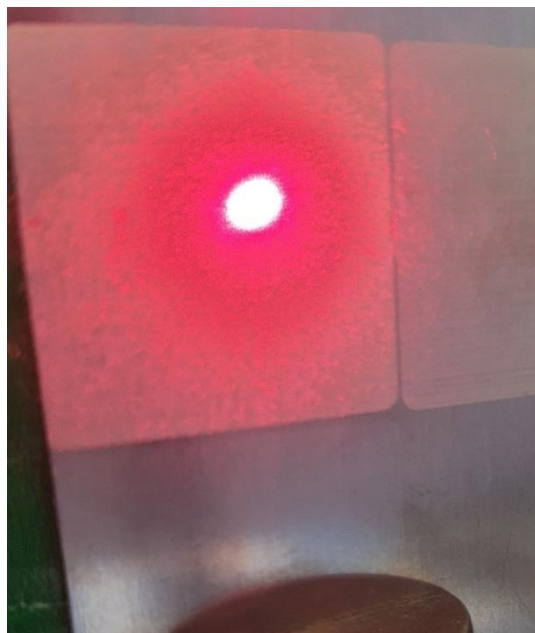


Рисунок 4.58 – Розсіювання випромінювання гелій-неонового лазера на поверхні зразка 4 при перпендикулярному напрямі падіння на зразок

Ступінь відхилення шорсткості $Ssk = 0,423$ мкм свідчить, що більшість її знаходиться нижче середньої лінії профілю. Головна відмінність полягає в тому, що дзеркальна складова у загальному розсіюванні відсутня, тобто реалізується варіант повного розсіювання червоного променя гелій-неонового лазера з наявністю інтерференційних структур, які неможливо ідентифікувати у звичайних умовах.

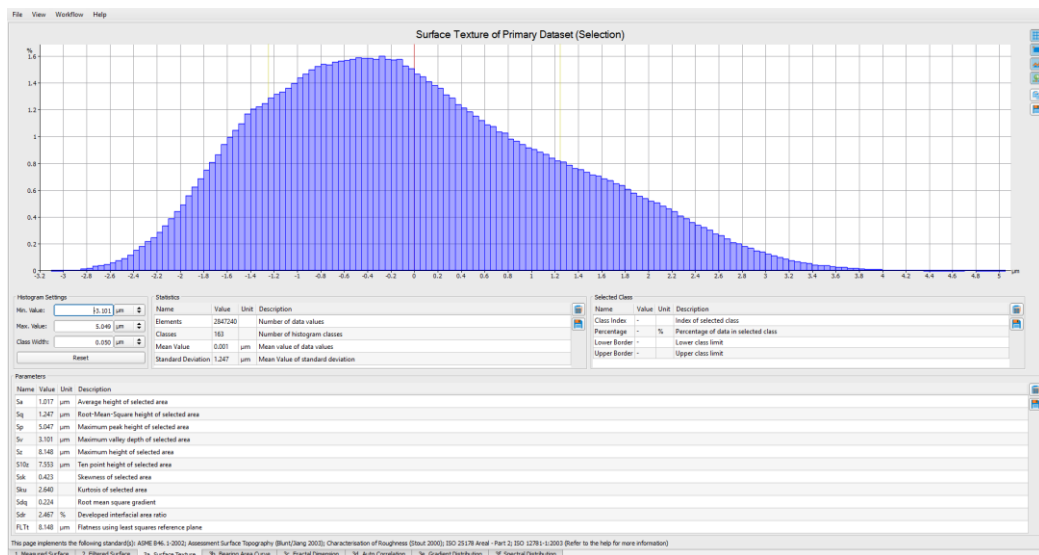


Рисунок 4.59 – Діаграма розподілу висот поверхню зразка 4 та параметри 3D шорсткості

Високий рівень розсіювання можна пояснити з використанням додаткових параметрів, представлених на рис. 4.59. По-перше, поверхні мають велике значення параметра $Sdq = 3,248$ мкм. Це означає, що значення середньоквадратичного градієнта ухилів у всіх точках області визначення є дуже високим тому, що чим сильніший ухил поверхні, тим більше Sdr . Справді $Sdr = 2,467$, і в той же час поверхня зразка 3 має значення $Sdr = 0,397$, що відповідає компонентам на поверхні з градієнтом близько $43-45^\circ$.

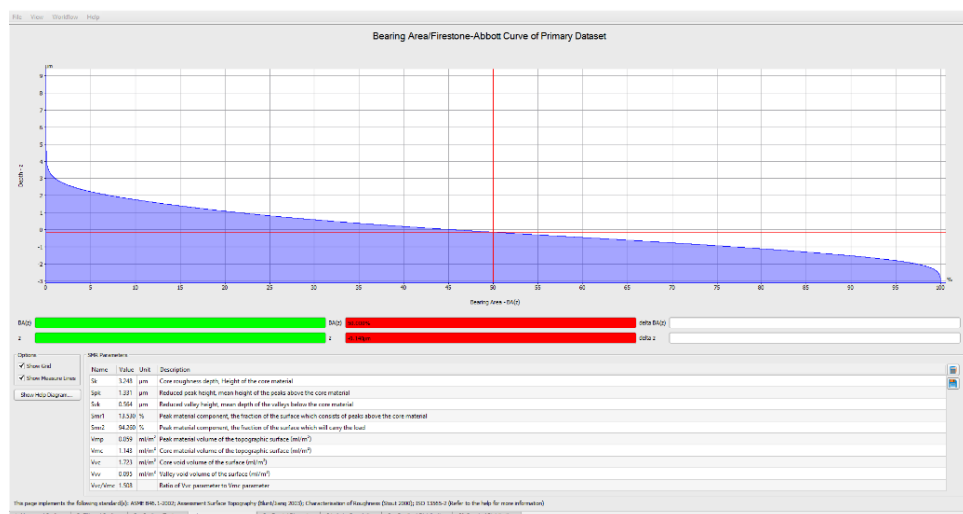


Рисунок 4.60 – Діаграма Bearing Area Curve розподілу висот по поверхні зразка 4 та параметри 3D шорсткості

Відповідно до розподілу висот на рис. 4.60 Sk є висотою поверхні серцевини та становить $Sk = 3,248$ мкм. За цим параметром $Spk = 1,331$ мкм показує зменшення середньої висоти пиків над поверхнею ядра. Інакше кажучи, поверхня зразка 4 має нерівне розподіл щодо висоти поверхні середини профілю. В результаті значення $Smr1 = 13,5\%$ (коефіцієнт площі матеріалу, що відокремлює зменшені піки від поверхні ядра), а $Smr2 = 94,2\%$ (коефіцієнт площі матеріалу, що відокремлює зменшені западини від поверхні ядра). Загальну картину особливостей розподілу 3D шорсткості доповнюють об'ємні параметри структур Vmp , Vmc , Vvc і Vvv , що являють собою об'єми зменшених пиків, матеріалу серцевини, порожнин серцевини та порожнеч западин відповідно. Співвідношення матеріалів за площею, що відокремлюють зменшені піки та зменшені западини від поверхні ядра: $Vmp=0,059$ мл/м², $Vmc=1,143$ мл/м², $Vvc=1,723$ мл/м², $Vvv=0,095$ мл/м².

Головним показником тут є співвідношення $Vvc/Vmc = 1,508$, що характеризує об'ємне співвідношення порожнеч серцевини та западин. Це також підтверджує важливу роль западин у розсіюванні світла лазера. Останній результат важливий не тільки для розсіювання світла лазера, а також проблем тертя, оскільки він характеризує характер розподілу рідини на поверхні зразка.

4.8 Висновки за розділом

Результати експериментів підтвердили можливість створення за рахунок наносекундного лазерного випромінювання як періодичних 3D структур, так і 3D структур з імовірнісним розподілом параметрів. Створені 3D структури носять зазвичай багаторівневий характер, залежить від технологічних параметрів обробки лазером.

З аналізу експериментальних даних було зроблено висновок у тому, що з кількісної оцінки параметрів розсіювання недостатньо використання трьох традиційних параметрів шорсткості R_a , R_z , R_q . Необхідно проводити комплексний аналіз поверхні відповідно до стандарту ISO 2518, оскільки розсіювання лазерного випромінювання більше залежить від параметрів нахилу 3D структур, округлення пиків та параметрів западин. Показано, що періодичні структури спектрів розсіювання, також створюють періодичні структури. Поверхні з імовірнісним розподілом 3D структур характеризуються переважанням дзеркальної складової у спектрах розсіювання.

Запропоновано метод контролю шорсткості поверхні шляхом використання ковзного лазерного опромінення за картинами інтерференційного розсіювання, як періодичних, так і ймовірних 3D структур. Крім того, метод дозволяє виконати суб'єктивну оцінку шорсткості на основі кольорової гами

поверхні. Для реалізації методу на практиці необхідно провести калібрувальні дослідження відповідності певного виду шорсткості та відповідної картини інтерференційного розсіювання.

Основні теоретичні та практичні положення, що знайшли підтвердження в результатах експериментів в даному розділі, можна сформулювати наступним чином.

Аналіз отриманих 3D структур шорсткості показав, що зі збільшенням зображення досліджуваної поверхні X50 поверхнева 3D структура зразків 1-4 і зразка «База» має значні відмінності. Вона характеризує посилення процесу структурування поверхні, що обробляється, її періодичності на мікро- і макро- рівнях, в залежності від умов обробки. Періодичність структури підтверджується параметрами поверхневої текстури, що характеризують ступінь усунення форми шорсткості – S_{sk} та параметром ексцесу виділеної ділянки – S_{ku} . Значення $S_{sk} = 0,47$ для зразка 4 вказує на відхилення нижче за середнє зміщення і це свідчить про збільшення глибини періодичних западин і піків поверхні. Поверхні зразків 1-3 не характеризуються суттєвими відхиленнями від базового значення. Також встановлено, що ексцес виділеної ділянки для зразка 2 $S_{ku} = 2,8$, зразка 3 $S_{ku} = 2,89$ і зразка 4 $S_{ku} = 2,64$ є перекошеним щодо середньої площини. Можна відзначити, що близькість до значення 3-го зразка свідчить про те, що у випадку зразка «База» та зразка 1, де $S_{ku} > 3$ спостерігається співіснування гострих та вдавлених частин поверхневих текстур, а розподіл за висотою носить шиповидний характер. Аналіз параметра S_{dr} щодо поверхневих текстур оброблених поверхонь зразків показав таке. Цей параметр, виражений відсотком додаткової площі поверхні роздільної здатності, створеної текстурою, в плоскій області визначення, приймає найбільше значення для поверхонь зразка 3 $S_{dr} = 0,39$ і 4 $S_{dr} = 2,47$.

Подібний розподіл максимальної висоти піків виділеної області S_p вказує на переважання піків у зразку 4 $S_p = 5,05$. Ці результати можуть бути непрямым свідченням скупчення розплаву, що відбувається внаслідок плавлення матеріалу або утворення значної кількості оксидів. Також це припущення для зразків 1-3 підтверджується тим, що співвідношення S_v між усіма зразками більш схоже, ніж S_p , що також характерне для значень параметрів S_z і S_{10z} . Для зразків 3 та 4 спостерігається розвинений рельєф профілю. Залежність параметрів R_a , R_q та R_z від напрямку вимірювання (X та Y) спостерігається для поверхонь цих зразків, меншою мірою для інших. Вищі значення цих параметрів мають місце для напрямку X , відповідного напрямку сканування лазерного променя. Це говорить про те, що розвиток поверхні пов'язаний не тільки з інтенсивністю процесу опромінення, але і з напрямком сканування лазерним променем. Поперечний переріз профілю шорсткості у напрямку X демонструє підвищення рівня

періодичності структури з інтенсифікацією лазерної обробки. Це спостереження підтверджується зміною ексцесу S_{ki} , а також спрямовану залежність параметрів профілю шорсткості.

Детальний аналіз 3D шорсткості зразків методом атомної силової мікроскопії підтвердив результати оптичних досліджень та дозволив уточнити особливості формування 3D структур залежно від технологічних параметрів обробки. Як очевидно з результатів AFM аналізу, створено майже всі основні типи 3D структур поверхні: можлива, квазіймовірна, квазіперіодична і періодична.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

- 1 Желябіна Н. К., Власов А. О. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання: навчально-методичний посібник. Запоріжжя, 2008. 240 с.
- 2 Marinello F., Pezzuolo A. Application of ISO 25178 standard for multiscale 3D parametric assessment of surface topographies // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 275. P. 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/275/1/012011.
- 3 ISO 25178. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Area – Part 1: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. Geneva: International Organisation for Standardization, 2011.
- 4 ISO 25178. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Area – Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. Geneva: International Organisation for Standardization, 2012.
- 5 ISO 16610. Geometrical Product Specifications (GPS) – Filtration – Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters. Geneva: International Organisation for Standardization, 2011.
- 6 Restivo T., Rodrigues J., Chouzal F., Menezes P. Online Systems for Training the Evaluation of Deviations of Geometrical Characteristics // *International Journal of Online Engineering*. 2013. Vol. 9, No. S8. DOI: [10.3991/ijoe.v9iS8.3355](https://doi.org/10.3991/ijoe.v9iS8.3355).
- 7 Magsipoc E., Zhao Q., Grasselli G. 2D and 3D Roughness Characterization // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019. DOI: [10.1007/s00603-019-01977-4](https://doi.org/10.1007/s00603-019-01977-4).
- 8 Candela T., Renard F., Bouchon M., Brouste A., Marsan D., Schmittbuhl J., Voisin C. Characterization of fault roughness at various scales: implications of three-dimensional high-resolution topography measurements // *Pure and Applied Geophysics*. 2009. Vol. 166. P. 1817–1851. DOI: 10.1007/s00024-009-0521-2.
- 9 Bhushan B. Surface roughness analysis and measurement techniques // *Modern Tribology Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- 10 Tatone B.S.A. Quantitative characterization of natural rock discontinuity roughness in-situ and in the laboratory: MASc thesis. Toronto: University of Toronto, 2009.
- 11 El-Soudani S.M. Profilometric analysis of fractures // *Metallography*. 1978. Vol. 11. P. 247–336. DOI: 10.1016/0026-0800(78)90045-9.
- 12 Whitehouse D.J. Handbook of surface metrology. Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1994.

- 13 Spragg R.C., Whitehouse D.J. An average wavelength parameter for surface metrology // *Measurement and Control*. 1972. Vol. 5. P. 95–101. DOI: 10.1177/002029407200500301.
- 14 Brown S.R. A note on the description of surface roughness using fractal dimension // *Geophysical Research Letters*. 1987. Vol. 14. P. 1095–1098. DOI: 10.1029/GL014i011p01095.
- 15 Lanaro F. A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000. Vol. 37. P. 1195–1210. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00052-6.
- 16 Wong P. Fractal surfaces in porous media // *American Institute of Physics*. New York, 1987. P. 304–317.
- 17 Renard F., Voisin C., Marsan D., Schmittbuhl J. High-resolution 3D laser scanner measurements of a strike-slip fault quantify its morphological anisotropy at all scales // *Geophysical Research Letters*. 2006. DOI: 10.1029/2005GL025038.
- 18 Grasselli G., Wirth J., Egger P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2002. Vol. 39. P. 789–800. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00070-9.
- 19 Tatone B.S.A., Grasselli G. A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials // *Review of Scientific Instruments*. 2009. Vol. 80. P. 125110. DOI: 10.1063/1.3266964.
- 20 Panorios, B., Vosniakos, G.-C. Predicting Surface Roughness in Machining: a Review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43, No. 8. P. 833–844.
- 21 Stephenson, D.A., Agapiou, J.S. *Metal Cutting Theory and Practice*. Third Edition. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. 862 p.
- 22 Ehmann, K.F., Hong, M.S. A Generalized Model of the Surface Generation Process in Metal Cutting // *CIRP Annals*. 1994. Vol. 43, No. 1. P. 483–486.
- 23 Grzesik, W. A revised model for predicting surface roughness in turning // *Wear*. 1996. Vol. 194. P. 143–148.
- 24 Baek, D.K., Ko, T.J., Kim, H.S. Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2001. Vol. 41. P. 451–462.
- 25 Kim, B.H., Chu, C.N. Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method // *Computer Aided Design*. 1999. Vol. 31. P. 485–494.
- 26 Lin, S.C., Chang, M.F. A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1998. Vol. 38. P. 763–782.

- 27 Dubey, V., Sharma, A.K., Pimenov, D. Prediction of Surface Roughness Using Machine Learning Approach in MQL Turning of AISI 304 Steel by Varying Nanoparticle Size in the Cutting Fluid // *Lubricants*. 2022. Vol. 10. P. 81–98. DOI: [10.3390/lubricants10050081](https://doi.org/10.3390/lubricants10050081).
- 28 Joshi, K., Patil, B. Prediction of Surface Roughness by Machine Vision using Principal Components based Regression Analysis // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 167. P. 382–391.
- 29 Patel, D.R., Kiran, M.B., Vakharia, V. Modeling and prediction of surface roughness using multiple regressions: A noncontact approach // *Engineering Reports*. 2020. Vol. 2. Article e12119. DOI: [10.1002/eng2.12119](https://doi.org/10.1002/eng2.12119).
- 30 Abu-Mahfouz, I., Banerjee, A., Rahman, E. Evaluation of Clustering Techniques to Predict Surface Roughness during Turning of Stainless-Steel Using Vibration Signals // *Materials (Basel)*. 2021. Vol. 14, No. 17. Article 5050. DOI: [10.3390/ma14175050](https://doi.org/10.3390/ma14175050).
- 31 Guo, M., Zhou, J., Li, X. Prediction of surface roughness based on fused features and ISSA-DBN in milling of die steel P20 // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 15951.
- 32 Yi, H., Liu, J., Ao, P., Lu, E., Zhang, H. Visual method for measuring the roughness of a grinding piece based on color indices // *Optics Express*. 2016. Vol. 24, No. 15. P. 17215–17233. DOI: [10.1364/OE.24.017215](https://doi.org/10.1364/OE.24.017215).
- 33 Lin Y.-C., Wu K.-D., Shih W.-C., Hsu P.-K., Hung J.-P. Prediction of Surface Roughness Based on Cutting Parameters and Machining Vibration in End Milling Using Regression Method and Artificial Neural Network // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 11. P. 3941. DOI: [10.3390/app10113941](https://doi.org/10.3390/app10113941)
- 34 Bai L., Yang Q., Cheng X., Ding Y., Xu J. A hybrid physics-data-driven surface roughness prediction model for ultra-precision machining // *Science China Technological Sciences*. 2023. Vol. 66. P. 1289–1303.
- 35 Zain A.M., Haron P., Sharif S. Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network // *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37, No. 2. P. 1755–1768. DOI: [10.1016/j.eswa.2009.07.033](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.07.033).
- 36 Guo J., Liu C., Chi J., Chen L. Comprehensive model for predicting surface roughness of ground workpieces considering the plowing effect // *Machining Science and Technology, An International Journal*. 2018. Vol. 22, No. 1.
- 37 Teimouri R., Skoczypiec S. Predictive modeling of roughness change in multistep machining // *Journal of Intelligent Manufacturing*. DOI: [10.1007/s10845-023-02224-y](https://doi.org/10.1007/s10845-023-02224-y).
- 38 Milling Surface Roughness Prediction Based on Physics-Informed Machine Learning // *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 10. P. 4969. DOI: [10.3390/s23104969](https://doi.org/10.3390/s23104969).

- 39 Garcia-Diaz A., Phillips D.T. Principles of experimental design and analysis. Chapman & Hall, 1995.
- 40 Deshpande A.A., Rehman M.A.M. Surface Roughness Prediction using Empirical Modelling Techniques: – A Review // *Journal of Physical Sciences Engineering and Technology*. 2022. Vol. 14, No. 01 SPL. P. 108–117. DOI: 10.18090/samriddhi.v14spli01.20.
- 41 Gdula M. Empirical Models for Surface Roughness and Topography in 5-Axis Milling Based on Analysis of Lead Angle and Curvature Radius of Sculptured Surfaces // *Metals*. 2020. Vol. 10, No. 7. P. 932–941. DOI: [10.3390/met10070932](https://doi.org/10.3390/met10070932).
- 42 Pandey P., Nayak A., Taufik M. Evaluation of mathematical models for surface roughness prediction of PolyJet 3D printed parts // *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022. DOI: 10.1080/2374068X.2022.2097416.
- 43 Lai J.-Y., Lin P.-C. Grinded Surface Roughness Prediction Using Data-Driven Models with Contact Force Information // *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2022. DOI: 10.1109/AIM52237.2022.9863402.
- 44 Wang X., Feng C.X. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002. Vol. 20. P. 348–356.
- 45 Shang L., Jiang G., Sun Z., Tian W. Roughness prediction of end milling surface for behavior mapping of digital twined machine tools // *Digital Twin*. 2022.
- 46 Mohankumar V., Kanthababu M., Velayudham A. Prediction of surface roughness using semi-empirical and regression models in machining of metal matrix composites using abrasive waterjet // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 3–4.
- 47 Shabarish P., Janardhana G.R., Vijaya K., Kumar R. Development of empirical model for prediction of surface roughness in turning operation // *International Journal of Innovative Technology and Creative Engineering*. 2013. Vol. 3, No. 7.
- 48 Xiao M., Xiaojie S., You M., Fei Y. Prediction of Surface Roughness and Optimization of Cutting Parameters of Stainless Steel Turning Based on RSM // *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: [10.1155/2018/905108](https://doi.org/10.1155/2018/905108).
- 49 So M.S., Seo G.J., Kim D.B., Shin J.H. Prediction of metal additively manufactured surface roughness using deep neural network // *Sensors*. 2022. Vol. 22. P. 7955. DOI: 10.3390/s22207955.
- 50 Vikram K.A., Tayjman Ch. Empirical model for Surface Roughness in hard turning based on Analysis of Machining Parameters and Hardness values of various Engineering Materials // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 2012. Vol. 2, No. 3. P. 3091–3097.

- 51 Dureja J.S., Gupta V.K., Bhatti M.S. A review of empirical modeling techniques to optimize machining parameters for hard turning applications // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016. Vol. 230, No. 3. DOI: [10.1177/0954405414558731](https://doi.org/10.1177/0954405414558731).
- 52 Trinh V.-L. A Review of the Surface Roughness Prediction Methods in Finishing Machining // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024. Vol. 14, No. 4.
- 53 Asiltürk I., Çunkas M. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 38. P. 5826–5832.
- 54 Mandal N.K., Singh N.K., Kumar U.C., Kumar V. Semi-Empirical Modeling of Surface Roughness in CNC End Milling // *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*. 2016. Vol. 6, No. 22. P. 3099–3109.
- 55 Sung A.N., Loh W.P., Ratnam M.M. Simulation approach for surface roughness interval prediction in finish turning // *International Journal of Simulation Modeling*. 2016. Vol. 15, No. 1. P. 42–55. DOI: 10.2507/IJSIMM15(1)4.320.
- 56 Kandananond K. Surface roughness prediction of FFF-fabricated workpieces by artificial neural network and Box–Behnken method // *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2021. Vol. 12. DOI: [10.1051/ijmqe/2021014](https://doi.org/10.1051/ijmqe/2021014).
- 57 He C., Yan J., Wang S., Zhang S. A theoretical and deep learning hybrid model for predicting surface roughness of diamond-turned polycrystalline materials // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2023. Vol. 5, No. 3. DOI: 10.1088/2631-7990/acdb0a.
- 58 Garg G.K., Pawanr S., Sangwan K.S. Comparative analysis of surface Roughness prediction models using soft computing techniques // *Enhancing Future Skills and Entrepreneurship*. 2020. P. 149–155.
- 59 Barrios J.M., Romero P.E. Decision Tree Methods for Predicting Surface Roughness in Fused Deposition Modeling Parts // *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 16. DOI: [10.3390/ma12162574](https://doi.org/10.3390/ma12162574).
- 60 Zhang W. Surface Roughness Prediction with Machine Learning // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1856. DOI: 10.1088/1742-6596/1856/1/012040.
- 61 Li Y., Dai W., Wu X., Kan Y. Surface Quality Evaluation Based on Roughness Prediction Model // *ICITEE '18: Proceedings of the International Conference on Information Technology and Electrical Engineering*. 2018. No. 32. P. 1–6. DOI: [10.1145/3148453.3306271](https://doi.org/10.1145/3148453.3306271).
- 62 Hwang C., Yoon K. Methods for Multiple Attribute Decision Making // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. 1981. Vol. 186. P. 58–181.

- 63 Walia H., Wilson C., Wahid A., Condsmine P. Expression analysis of barley during salinity stress // *Functional and Integrative Genomics*. 2006. Vol. 6. P. 143–156.
- 64 Cox E.A. Fuzzy Fundamentals // *IEEE Spectrum*. 1992. Vol. 29. P. 58–61.
- 65 Sugeno M., Kang G.T. Structure Identification of Fuzzy Model // *Fuzzy Sets and Systems*. 1988. Vol. 28. P. 15–33. DOI: [10.1016/0165-0114\(88\)90113-33](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90113-33).
- 66 Sugeno M., Kang T., Kang G. Structure Identification of Fuzzy Model // *Fuzzy Sets and Systems*. 1988. Vol. 28. P. 15–33. DOI: [10.1016/0165-0114\(88\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90113-3).
- 67 Jang R.J. Fuzzy modeling using generalized neural networks and Kalman filter algorithm // *Proceedings of the Ninth National Conference on Artificial Intelligence*. 1991. P. 762–767.
- 68 Jang R.J. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE Transactions on Systems of Man and Cybernetics*. 1993. Vol. 23, No. 3. P. 665–685.
- 69 Jang J.-S., Sun C.-T. Neuro-Fuzzy Modeling and Control // *Proceedings of the IEEE*. 1995. Vol. 83. P. 378–406. DOI: [10.1109/5.364486](https://doi.org/10.1109/5.364486).
- 70 Chandrasekaran M., Muralidhar M., Krishna C. M., Dixit U.S. Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 46. P. 445–464.
- 71 Dogan I. An overview of soft computing // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 102. P. 34–38.
- 72 Rowley H.A., Baluja S., Kanade T. Neural network-based face detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1998. Vol. 20, No. 1. P. 23–38.
- 73 Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353. DOI: [10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- 74 Zadeh L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1973. Vol. 3. P. 28–44.
- 75 Klir G., Yuan B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*. Vol. 4. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- 76 Parveen S.S., Kavitha C. Segmentation of CT lung nodules using FCM with firefly search algorithm // *Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, 2015 International Conference on. IEEE, 2015.
- 77 Goldberg G.E. *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Reading, MA: Addison Wesley, 1989.

- 78 Chryssolouris G., Guillot M. A comparison of statistical and AI approaches to the selection of process parameters in intelligent machining // *ASME Journal of Engineering Industry*. 1990. Vol. 112. P. 112–131.
- 79 Feng C.-X., Wang X.-F. Surface roughness predictive modelling: neural networks versus regression // *IIE Transactions*. 2003. Vol. 35. P. 11–27.
- 80 Phonsa G., Kumar K. A Comprehensive Review of Soft Computing Techniques // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018. Vol. 13, No. 11. P. 9881–9886.
- 81 Brooks R.R. *Soft Computing Techniques. Distributed Sensor Networks*. 2004. P. 321.
- 82 Deb K. *Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples*. New York: Prentice-Hall, 1995.
- 83 Dorigo M. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1996. Part B. Vol. 26. P. 1–13.
- 84 Dorigo M., Socha K. Ant colony optimization for continuous domain // *European Journal of Operational Research*. 2008. Vol. 185. P. 1155–1173.
- 85 Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, ICNN'95, Perth, Australia*. 1995.
- 86 Lachaud F., Piquet R., Collombet F., Surcin L. Drilling of composite structures // *Composite Structures*. 2001. Vol. 52. P. 511–516.
- 87 Marques A.T., Durao L.M., Magalhaes A.G., Tavares J.M. Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates // *16th International Conference on Composite Materials*. Porto, 2007. P. 1–10.
- 88 NewLaser. Лазерні системи MiniMarker 2. — Режим доступу: <https://newlaser.info> [Дата звернення: 25.06.2024]
- 89 Keyence. Цифровий мікроскоп VHX-7100. — Режим доступу: <https://www.keyence.co.uk/products/microscope/digital-microscope/vhx-7000/models/vhx-7100/> [Дата звернення: 25.06.2024].
- 90 ZEISS. Axio Scope.A1: Цифровий мікроскоп для металографії та матеріалознавства. — Режим доступу: <https://www.zeiss.com/microscopy/en/products/axio-scope-a1.html> [Дата звернення: 26.06.2024].
- 91 IndustryArena. ZEISS Axio Lab.A1: Мікроскоп для високопродуктивної металографії та аналізу дефектів матеріалів. — Режим доступу: <https://en.industryarena.com/zeiss/products/axio-lab-a1--14390> [Дата звернення: 26.06.2024].
- 92 Приходько В. О., Добротворський С. С., Басова Є. В., Алексенко Б. О., Завадський П., Кощинський М. Дослідження шорсткості поверхні зразка сталі AISI 321 після короткоімпульсного наносекундного лазерного

оброблення // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доповідей 32-ї міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD–2024, [22–25 травня 2024 р.] / за ред. Є. І. Сокола. – Харків: НТУ "ХПІ", 2024. – С. 208.

- 93 Zawadzki, P., Dobrotvorskiy, S., Aleksenko, B., Basova, Y., Trubin, D., Prykhodko, V., Kościński, M. Features of Modification of the Roughness and Hardness of the Surface of AISI 321 Stainless Steel with Short-Pulse Laser Radiation // International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2024 : Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham : Springer, 2024. – Vol. 1129. – P. 51–60. – DOI: [10.1007/978-3-031-70670-7_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7_4).
- 94 Bruker. Dimension Icon. Atomic Force Microscope. Офіційний сайт компанії Bruker [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/microscopes/spm-and-afm/dimension-icon.html> – Назва з екрана.
- 95 Stanford Nano Shared Facilities. Scanning Probe Microscopy: Bruker Dimension Icon [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://snsf.stanford.edu/equipment/spm-bruker-dimension-icon> – Назва з екрана.
- 96 Alicona IF-PortableRL – портативна оптична 3D вимірювальна система [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Alicona. – Режим доступу: <https://www.alicon.com/en/products/portable/portable-rl> – Дата доступу: 25.07.2024
- 97 Alicona PortableRL – мобільна високоточна вимірювальна система [Електронний ресурс] // Tolerans Industrial. – Режим доступу: <https://www.mytolerans.se/upl/files/171913/portablerl-product-flyer-en.pdf> – Дата доступу: 25.07.2024.
- 98 Dobrotvorskiy S., Aleksenko B. A., Basova Y., Gnilitskiy I. M., Kościński M., Machado J. Light Beam Scattering from the Metal Surface with a Complex Mono- and Two-Periodic Microstructure Formed with Femtosecond Laser Radiation // Applied Sciences. – 2024. – Т. 14, № 19. – 8662. – <https://doi.org/10.3390/app14198662>.
- 99 Aleksenko B. A., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Prykhodko V., Kościński M. Computer Modeling and Comparative Analysis of Surface Microrelief Control by the Method of Reflection of a Sliding Laser Beam // У кн.: Arsenyeva O., Romanova T., Sukhonos M., Biletskyi I., Tsegelnyk Y. (ред.) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham : Springer, 2023. – Т. 808. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_39.

- 100 Dobrotvorskiy S., Aleksenko B. A., Basova Y., Prykhodko V., Kościński M. Computer Modelling and Comparative Analysis of Surface Microrelief Inspection by the Method of Scattering of a Laser Beam During Its Small-Angle Sliding Incidence // У кн.: Ciobață D. D. (ред.) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham : Springer, 2023. – Т. 762. – С. 237–252. –https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_20.
- 101 Dobrotvorskiy S., Aleksenko B. A., Kościński M., Basova Y., Prykhodko V. Modeling and Surface Modification of AISI 321 Stainless Steel by Nanosecond Laser Radiation // У кн.: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Rauch E., Pitel' J. (ред.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham : Springer, 2023. – С. 205–215. –https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_20.
- 102 Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). The Relief of the Structured by Nanosecond Laser Stainless Steel Surface Inspection by Sliding Reflection of a Laser Beam. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice . EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, pp. 65–77. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_5

Наукове видання

ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ

ДОБРОТВОРСЬКИЙ Сергій Семенович

ХАВІН Геннадій Львович

БАСОВА Євгенія Володимирівна

АЛЕКСЕНКО Борис Олександрович

ПРИХОДЬКО Вадим Олександрович

Відповідальний за випуск проф. Пермяков О.А.

В авторській редакції

Ум. друк. арк. 6,6

Підп. до друку Гарнітура Times New Roman.

Видавничий центр НТУ «ХПІ», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002 Свідоцтво
про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронне видання



С.С. Добротворський

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні
верстати Навчально-наукового інституту механічної інженерії
і транспорту, Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут».

ORCID: 0000-0003-1223-1036



Г.Л. Хавін

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні
верстати Навчально-наукового інституту механічної інженерії
і транспорту, Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут».

ORCID: 0000-0002-4340-7615



Є.В. Басова

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технологія машинобудування і металорізальні
верстати Навчально-наукового інституту механічної інженерії
і транспорту, Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут».

ORCID: 0000-0002-8549-4788



Б.О. Алексенко

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
кафедри технологія машинобудування і металорізальні
верстати Навчально-наукового інституту механічної інженерії
і транспорту, Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут».

ORCID: 0000-0001-9680-9370



В.О. Приходько

доктор філософії,
кафедра технологія машинобудування і металорізальні
верстати Навчально-наукового інституту механічної інженерії
і транспорту, Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут».

ORCID: 0000-0003-2094-7472