

УДК 621.787:519.87

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ВІБРАЦІЙНО- ВІДЦЕНТРОВОМУ ЗМІЦНЕННІ НА ОСНОВІ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

І. В. Климаш

ivan.v.klymash@lpnu.ua,

ORCID: 0009-0006-2384-3539

Національний університет
«Львівська політехніка»,
79013, Україна, м. Львів,
вул. С. Бандери, 12

Підвищення експлуатаційної надійності відповідальних деталей машин значною мірою визначається станом поверхневого шару, що формується на фінішних операціях. У зв'язку з цим актуальним є дослідження процесів поверхневого пластичного деформування, які дозволяють поєднати зміцнення структури із забезпеченням мінімальної шорсткості поверхні. У роботі досліджено процес формування шорсткості поверхні сталі 30ХГСА при вібраційно-відцентровому зміцненні із використанням закріплених профільованих роликів. На відміну від обробки у вільному абразиві, такий підхід забезпечує детермінований характер процесу й технологічне успадкування геометрії інструмента на деталі з концентраторами напружень. Метою роботи є встановлення кількісних закономірностей впливу технологічних чинників: часу обробки (t), амплітуди коливань (A) й робочого зазору (Z) на середньоарифметичне відхилення профілю R_a . Для вирішення задачі застосовано методологію повного факторного експерименту типу 2^3 із логарифмічним перетворенням вхідних змінних, що дозволило лінеаризувати степеневу модель і забезпечити високу точність апроксимації. Статистичний аналіз за критеріями Кохрена, Ст'юдента та Фішера підтвердив адекватність моделі й допоміг виявити, що домінуючим чинником виступає робочий зазор (Z). Виявлено негативний ефект надмірної тривалості обробки (понад 8 хв для сталі даного класу), що призводить до зростання R_a внаслідок мікротомного руйнування й явища перенаклепу поверхневого шару. За допомогою методу крутого сходження Бокса-Вілсона визначено оптимальну траєкторію руху у просторі факторів, яка дозволяє забезпечити зниження шорсткості з 6,45 мкм до прогнозованого рівня 1,68 мкм. Отримана модель ($R=0,998$) має високу прогностичну здатність і може бути використана як математичне підґрунтя для алгоритмізації фінішних операцій зміцнення й розробки систем технологічної підготовки виробництва. Отримані результати дозволяють обґрунтувати раціональні режими вібраційно-відцентрового зміцнення профільованим інструментом, що забезпечує формування стабільного мікрорельєфу і створення залишкових напружень стиску. Це сприяє підвищенню експлуатаційної довговічності й втомної міцності деталей із концентраторами напружень.

Ключові слова: вібраційно-відцентрове зміцнення, шорсткість поверхні, повний факторний експеримент, математичне моделювання, рівняння регресії, метод Бокса-Вілсона, оптимізація технологічних режимів.

Вступ

Забезпечення експлуатаційної надійності відповідальних деталей машин, що працюють в умовах циклічних навантажень, є одним із пріоритетних завдань сучасного машинобудування [1]. Відомо, що втомне руйнування зазвичай зароджується в зонах концентрації напружень, таких як впадини різьбових профілів і технологічні канавки. Традиційні методи лезової та абразивної обробки не завжди дозволяють сформувати поверхневий шар із необхідними фізико-механічними властивостями, оскільки часто супроводжуються залишковими напруженнями розтягу й дефектами мікрогеометрії [2]. У зв'язку з цим широкого застосування набувають методи поверхневого пластичного деформування, які забезпечують зміцнення структури, підвищення мікротвердості і створення полів стискаючих залишкових напружень, що блокують розвиток мікротріщин [3, 4]. Серед методів поверхневого пластичного деформування (ППД) особливе місце посідає вібраційно-відцентрове зміцнення. Цей процес базується на синергетичному поєднанні низькочастотного вібраційного поля і відцентрових сил, що дозволяє інтенсифікувати пластичну деформацію й забезпечити формування регулярного мікрорельєфу [5]. Параметри динамічної взаємодії (кінетична енергія удару, частота, робочий зазор) є визначальними для формування регулярного мікрорельєфу й забезпечення заданої якості поверхні [6]. Математичне моделювання таких процесів дає змогу прогнозувати стан поверхневого шару ще на етапі проєктування [7]. Особливої уваги потребує вивчення

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© І. В. Климаш, 2026

режимів зміцнення для конструкційних легованих сталей, зокрема, сталі 30ХГСА. Висока вихідна твердість і специфічна карбідна неоднорідність цього матеріалу створюють ризик виникнення дефектів типу «перенаклепу» або мікротріщин при надмірно інтенсивних режимах обробки [8].

Аналіз досліджень і публікацій

Дослідженню фізико-хімічних основ, динаміки й технологічних можливостей вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ) присвячено фундаментальні праці провідних науковців. Зокрема, детально вивчено механізми формування ультрадрібнозернистої структури й градієнтних фазових станів у поверхневому шарі, що забезпечують значне підвищення втомної міцності і зносостійкості деталей [4, 9]. Встановлено, що за умов інтенсивної пластичної деформації при ВВЗ розмір зерна може зменшуватися до 19-43 нм, що супроводжується зростанням мікротвердості матеріалу [8]. Попередні дослідження процесу ВВЗ, проведені на інструментальній сталі ХВГ, продемонстрували значний потенціал методу у підвищенні експлуатаційних характеристик: зафіксовано зростання мікротвердості поверхневого шару на 31,8% порівняно з вихідним станом. Це підтверджує, що динамічна ударна дія при ВВЗ забезпечує не лише формування рельєфу, а й глибоку структурну модифікацію матеріалу.

Вивчено можливість формування зміцненого шару зі значною глибиною (до 6 мм) і високим рівнем стискаючих залишкових напружень, які досягають 1600 МПа [2, 6]. Побудовані моделі базуються на принципах функціонально-орієнтованого проєктування, що дозволяє технологічно забезпечувати задані параметри якості.

Однак аналіз існуючих публікацій свідчить про те, що більшість розроблених математичних моделей орієнтована на процеси обробки деталей у вільному абразивному або зміцнюючому середовищах. У таких моделях шорсткість розглядається як результат множинних хаотичних мікроударів часток середовища, рух яких часто описується через динаміку «псевдогазу» [7, 10]. На відміну від такої обробки у вільному абразиві, використання закріплених профільованих роликів робить процес детермінованим. Це забезпечує технологічне успадкування геометрії інструмента на деталі з концентраторами напружень, що є ключовою перевагою даної роботи, оскільки дозволяє прогнозувати параметри мікрорельєфу.

Специфіка ж локального зміцнення впадин різьбових канавок і технологічних концентраторів вимагає використання закріплених на пристрої профільованих роликів. У цьому випадку:

1) процес стає детермінованим, тобто геометрія інструмента копіюється на профіль деталі за принципами технологічного успадкування [2].

2) динаміка системи визначається не лише параметрами вібрації, а й жорсткістю інструментальної системи й величиною робочого зазору (Z), який виступає основним регулятором кінетичної енергії удару.

Це зумовлює необхідність уточнення математичного апарату для прогнозування середньоарифметичного відхилення профілю R_a як функції динамічних чинників саме для схем із дискретним профільованим контактом, що і розглядається у даній роботі.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є встановлення кількісних закономірностей впливу ключових технологічних чинників вібраційно-відцентрового зміцнення: часу обробки (t), амплітуди коливань (A) і робочого зазору (Z), на формування середньоарифметичного відхилення профілю R_a деталей зі сталі 30ХГСА при використанні профільованих роликів, а також обґрунтування раціональної траєкторії обробки для мінімізації шорсткості поверхні. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– визначити статистично значущі технологічні фактори й оцінити характер їхнього взаємного впливу на параметри якості поверхні в умовах ударно-імпульсної дії роликів;

– побудувати адекватну математичну модель у вигляді регресійного рівняння, що дозволяє прогнозувати рівень шорсткості R_a залежно від динамічних режимів роботи системи;

– провести технологічну інтерпретацію фізичного впливу кожного параметра на стан поверхневого шару, зокрема, ролі робочого зазору (Z) як основного регулятора кінетичної енергії зміцнення;

– розробити практичні рекомендації щодо вибору режимів обробки деталей із концентраторами напружень на основі методу крутого сходження Бокса-Вілсона, забезпечуючи досягнення мінімальної шорсткості без ризику виникнення дефектів перенаклепу.

Матеріали та методи дослідження

Методологія й планування експерименту. Для ефективного вивчення складних багатофакторних процесів, яким визнається вібраційно-відцентрове зміцнення, важливим є застосування формалізованого підходу до планування експерименту. У даному дослідженні використано методологію повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^3 , що дозволяє отримати максимальний обсяг інформації про вплив кожного чинника та їх взаємодій при мінімально необхідній кількості дослідів ($N=8$), забезпечуючи високу надійність і достовірність висновків.

Експериментальна установка й об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження були зразки зі сталі 30ХГСА (рис. 1), яка характеризується високою твердістю.

Механізм роботи установки ВВЗ. Експериментальні дослідження проводилися на спеціалізованому вібраційному маятниковому напівавтоматі (рис. 2). Конструкція машини забезпечує роботу в зарезонансному режимі, що гарантує високу стабільність амплітудних характеристик процесу. Ключова особливість системи – трансформація кінетичної енергії машини у локалізований зміцнювальний вплив на поверхню концентратора напружень. Джерелом енергії виступає асинхронний двигун (1,7 кВт), який через пасову передачу приводить у рух двосекційний вал із дебалансами.

Процес зміцнення відбувається за допомогою експериментального пристрою (рис. 3), закріпленого на робочому столі машини. У процесі обертання вала генеруються складні просторові еліптичні траєкторії робочого столу, які трансформуються у спрямовану планетарну кінематику роликів вузла. Це забезпечує високу частоту ударних імпульсів безпосередньо в корені концентратора. Під дією вібраційно-відцентрової сили три профільовані ролики інерційно переміщуються в межах робочого зазора в напрямку деталі. Завдяки високій твердості профільованого ролика (62 HRC) й точному збігу профілів ролика і різьподібної канавки енергія удару фокусується на дні концентратора. Це викликає інтенсивне поверхневе пластичне деформування, що призводить до наноструктуризації зерен і формування стабільного шару залишкових напружень стиску. Після удару, через зміну вектора прискорення столу, ролик відходить назад. Вільне обертання верхньої частини пристрою забезпечує поступовий поворот роликів навколо деталі. Кожен наступний удар припадає на нову точку по колу канавки, забезпечуючи суцільність зміцненого шару.



Рис. 1. Зразок із локалізованим концентратором напружень (різьподібна канавка)

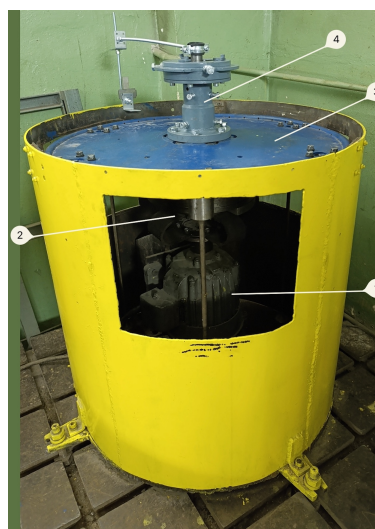


Рис. 2. Загальний вигляд маятникового напівавтомата для вібраційно-відцентрового зміцнення:

- 1 – двигун; 2 – вал із дебалансами; 3 – робочий стіл; 4 – експериментальний пристрій

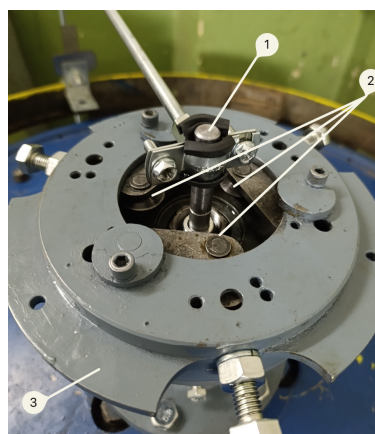


Рис. 3. Експериментальний пристрій, змонтований на установці ВВЗ:

- 1 – зразок; 2 – ролики з різьбовим профілем; 3 – корпус пристрою

Визначення факторів і параметрів відгуку. У ході дослідження визначено наступні змінні.

Незалежні фактори (вхідні параметри процесу):

– час обробки (t , хв) – тривалість ударно-імпульсної дії;

– амплітуда вібрації (A , мм) – розмах коливань частини пристрою;

– робочий зазор (Z , мм) – відстань між роликком і дном канавки, що визначає енергію розгону інструмента.

Залежний параметр (параметр відгуку) – середньоарифметичне відхилення профілю (R_a , мкм) – ключовий показник шорсткості, що характеризує якість обробленої поверхні.

Методика вимірювання середньоарифметичного відхилення профілю R_a . Для забезпечення прецизійної точності вимірювань у важкодоступній зоні кореня різеподібної канавки використано безконтактний інтерференційний 3D-профілометр «Мікрон-альфа». Вибір методу білої світлової інтерферометрії дозволив уникнути похибок, притаманних щуповим методам, де радіус голки часто перевищує радіус впадини мікропрофілю. Процес вимірювання включав вертикальне сканування об'єктивом для фіксації моментів максимального контрасту інтерференції, на основі чого будувалася цифрова карта висот. Значення R_a розраховувалося програмним забезпеченням як середнє арифметичне абсолютних відхилень точок профілю від середньої лінії на базовій довжині. Для кожного з 8 дослідів згідно з матрицею планування проводилося по два паралельні заміри у різних точках вздовж канавки.

Рівні варіювання факторів і кодування змінних. Оскільки зв'язок між параметрами шорсткості й режимами ППД зазвичай має степеневий характер

$$R_a = C_0 \cdot t^m \cdot A^n \cdot Z^p,$$

то для лінеаризації моделі застосовано логарифмічне перетворення вхідних змінних. Перехід від натуральних значень (t , A , Z) до кодованих безрозмірних змінних (X_1 , X_2 , X_3) здійснювався шляхом логарифмування натуральних значень факторів згідно з межами варіювання, наведеними в табл. 1. Для кожного фактора обрано два рівні варіювання: нижній (-1) і верхній (+1), що визначають межі досліджуваного діапазону.

Таблиця 1. Рівні та інтервали варіювання

Фактор	Символ	Натуральні одиниці	Нижній (-1)	Верхній (+1)	Базовий рівень (X^0)	Інтервал варіювання (ΔX_i)
Час, хв	X_1	хв	2	8	5	3
Амплітуда, мм	X_2	мм	1	5	3	2
Зазор, мм	X_3	мм	4	10	7	3

Експериментальні дані та побудова математичної моделі

Обробка ВВЗ проводилася для сталі 30ХГСА за наступних значень факторів: час (t) 2–8 хв, амплітуда (A) 1–5 мм, робочий зазор (Z) 4–10 мм. Для забезпечення високої відтворюваності й можливості оцінки помилки експерименту, кожен дослід проводився двічі ($r=2$). Отримані значення шорсткості R_a для кожного дослідів наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Вихідні дані

№ дослідів	Час (t)	Амплітуда (A)	Робочий зазор (Z)	R_{a1}	R_{a2}
1	8	5	10	8,437	6,365
2	2	5	10	1,331	0,803
3	8	1	10	3,038	3,620
4	2	1	10	0,832	1,056
5	8	5	4	29,682	26,631
6	2	5	4	13,013	11,800
7	8	1	4	41,742	55,936
8	2	1	4	8,916	6,442

Побудова математичної моделі та статистична перевірка її адекватності. Повна матриця планування, що включає кодовані й натуральні значення факторів, а також результати вимірювань шорсткості, представлена в табл. 3.

Таблиця 3. Матриця планування експериментів

№ досліду	X ₁		X ₂		X ₃		R _{a1} , мкм	ln R _{a1}	R _{a2} , мкм	ln R _{a2}	\bar{R}_a , мкм	$\bar{Y}_v = \ln \bar{R}_a$
	код	t, хв	код	A, мм	код	Z, мм						
1	+1	8	+1	5	+1	10	8,437	2,133	6,365	1,851	7,401	1,992
2	-1	2	+1	5	+1	10	1,331	0,286	0,803	-0,219	1,067	0,034
3	+1	8	-1	1	+1	10	3,038	1,111	3,620	1,286	3,329	1,199
4	-1	2	-1	1	+1	10	0,832	-0,184	1,056	0,054	0,944	-0,065
5	+1	8	+1	5	-1	4	29,682	3,391	26,631	3,282	28,157	3,337
6	-1	2	+1	5	-1	4	13,013	2,566	11,800	2,468	12,407	2,517
7	+1	8	-1	1	-1	4	41,742	3,732	55,936	4,024	48,839	3,878
8	-1	2	-1	1	-1	4	8,916	2,188	6,442	1,863	7,679	2,026

На основі матриці планування розраховано коефіцієнти регресії. Рівняння регресії з кодованими змінними, що враховує взаємодію факторів

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (1)$$

Загальний вигляд рівняння регресії в кодованих безрозмірних змінних з урахуванням усіх ефектів взаємодії набув вигляду

$$Y = 1,865 + 0,737 X_1 + 0,105 X_2 - 1,075 X_3 - 0,042 X_1 X_2 + 0,068 X_1 X_3 + 0,117 X_2 X_3 + 0,215 X_1 X_2 X_3.$$

Статистичний аналіз та оптимізація моделі. Для підтвердження достовірності отриманих результатів проведено комплексний статистичний аналіз.

1. Перевірка однорідності дисперсій: розрахунок за критерієм Кохрена показав, що $G=0,402$. Оскільки отримане значення менше критичного ($G<0,6798$ для $\alpha=0,05$), гіпотеза про однорідність дисперсій приймається. Вказане свідчить про високу якість проведення дослідів.

2. Оцінка значущості коефіцієнтів: за критерієм Стюдента визначено довірчий інтервал $\Delta bi=0,1155$. Встановлено, що значущими є коефіцієнти b_0, b_1, b_3, b_{23} і b_{123} . Коефіцієнт $b_2=0,105$, хоча він менший за поріг значущості, залишений у моделі для збереження фізичного опису впливу амплітуди вібрації на процес зміцнення. Члени b_{12} та b_{13} визнані незначущими і вилучені з моделі.

3. Адекватність моделі: перевірка за критерієм Фішера підтвердила адекватність побудованого рівняння. Розрахункове значення $F=1,303$ значно менше за табличне $F_{кр}=4,46$, що дозволяє використовувати модель для прогнозування.

4. Точність апроксимації: розрахований коефіцієнт множинної кореляції $R=0,9981$ свідчить про те, що отримана математична модель на 99,8% описує реальні фізичні процеси формування мікрорельєфу сталі 30ХГСА при ВВЗ.

Математична модель у натуральних змінних. Після проведення процедури потенціювання й переходу від логарифмічних кодів до фізичних параметрів (t, A, Z) емпірична залежність для визначення середньоарифметичного відхилення профілю R_a (мкм) прийняла наступний вигляд:

$$\bar{R}_a = 28,48 \cdot t^{2,31} \cdot A^{1,68} \cdot Z^{(-1,66-0,67 \ln t - 0,84 \ln A + 0,83 \ln t \ln A)} \cdot e^{-1,53 \ln t \ln A}.$$

Аналіз та обговорення результатів

Аналіз отриманої моделі дозволяє зрозуміти, як саме кожен технологічний параметр та їх комбінації впливають на кінцеву якість поверхні, що вимірюється шорсткістю R_a . Висока прогностична здатність моделі ($R=0,9981$) зумовлена детермінованим характером взаємодії: на відміну від стохастичних процесів у вільному середовищі, де панують хаотичні мікроудари, використання профільованого інструменту гарантує чітке копіювання профілю за принципом технологічного успадкування. Це дозволяє з високою точністю керувати формуванням R_a через параметри зазору, часу й амплітуди.

Ранжування абсолютних величин коефіцієнтів регресії (1) дає змогу встановити ієрархію впливу чинників на формування шорсткості:

– домінуючий вплив зазору (Z): коефіцієнт $b_3= -1,075$ є найбільшим за модулем, що визначає зазор як найвпливовіший фактор у досліджуваному діапазоні. Від'ємний знак однозначно свідчить про те, що збільшення зазору (до 10 мм) призводить до значного зменшення шорсткості. Фізично це пояснюється зростанням амплітудного простору для розгону роликів, що дозволяє інструменту накопичити більшу кінетичну енергію перед ударом, забезпечуючи інтенсивніше згладжування вихідних нерівностей;

– вплив часу обробки (t): коефіцієнт $b_1=0,737$ є другим за величиною і має додатний знак. Це означає, що зростання шорсткості (погіршення якості) відбувається зі збільшенням тривалості обробки понад оптимальні значення. Такий ефект може бути пов'язаний з явищами втоми поверхневого шару або накопиченням мікропошкоджень при надмірно тривалій ударній дії. Отримані результати щодо зміни шорсткості корелюють із фізикою зміцнення сталей при ППД. Слід зазначити, що при аналогічних режимах обробки сталі ХВГ було досягнуто підвищення мікротвердості, що вказує на інтенсивну пластичну деформацію. Для досліджуваної сталі 30ХГСА це пояснює характер зміни R_a : початкове інтенсивне згладжування супроводжується зростанням твердості, проте при перевищенні порогу енергоємності (час понад 8 хв) ресурс пластичності вичерпується, що призводить до мікротомного руйнування;

– вплив амплітуди вібрації (A): коефіцієнт $b_2=0,105$ найменший серед лінійних ефектів. Це вказує на те, що самостійний вплив амплітуди на шорсткість у межах досліджених значень (від 1 до 5 мм) менш значущий порівняно з часом обробки й зазором.

Складна нелінійна природа процесу ВВЗ підтверджується значущістю ефектів взаємодії ($b_{23}=0,117$ та $b_{123}=0,215$). Це означає, що вплив кожного фактора динамічно змінюється залежно від рівнів інших параметрів, що робить використання отриманого рівняння регресії необхідним для точного керування процесом.

Для ієрархічного ранжування ступеня впливу досліджуваних чинників на якість поверхні побудовано діаграму Парето (рис. 4).

У процесах вібраційно-відцентрового зміцнення середньоарифметичне відхилення профілю поверхні (R_a) та її напружений стан є взаємопов'язаними результатами трансформації кінетичної енергії ударів інструмента в роботу пластичної деформації. Цей зв'язок базується на таких ключових механізмах, як:

– енергетичний розподіл: кінетична енергія ударів роликів витрачається одночасно на два процеси – згладжування вихідних мікронерівностей (зниження R_a) і накопичення пластичної деформації у поверхневих і підповерхневих шарах;

– компенсація мікроконцентраторів напружень: нерівності профілю діють як мікроконцентратори напружень, де теоретичний коефіцієнт концентрації зростає пропорційно висоті нерівностей. Залишкові стискаючі напруження створюють ефект «попереднього навантаження». Це генерує зусилля «закриття» потенційних втомних тріщин на дні мікрозападин профілю, що підвищує втомну міцність;

– вплив режимів обробки й ефект перенаклепу: збільшення робочого зазору (Z) до 10 мм розширює простір для розгону роликів, що забезпечує вищу енергію удару, інтенсивніше згладжування поверхні й одночасне підвищення рівня стискаючих напружень. Однак виявлене в експерименті зростання R_a при тривалості обробки понад 8 хв свідчить про вичерпання ресурсу пластичності матеріалу. Цей ефект, відомий як «перенаклеп», супроводжується мікротомним руйнуванням і релаксацією (зниженням) стискаючих напружень через втрату суцільності металу.

Оптимізація процесу за методом Бокса-Вілсона.

Для мінімізації середньоарифметичного відхилення профілю R_a застосовано метод крутого сходження (рис. 5), який дозволяє системно аналізувати складні взаємозв'язки факторів і знаходити екстремум при мінімальній кількості контрольних дослідів. Напрямок руху до оптимуму визначено за знаками лінійних коефіцієнтів отриманого рівняння (1): час обробки (t) і амплітуда (A) підлягали зменшенню, а робочий зазор (Z) – збільшенню. За базовий фактор обрано зазор (Z) із кроком варіювання $\Delta Z=1,0$ мм. Пропорційні кроки для інших факторів розраховані на основі відношення їхніх коефіцієнтів до b_3 .



Рис. 4. Діаграма Парето впливу технологічних чинників на шорсткість

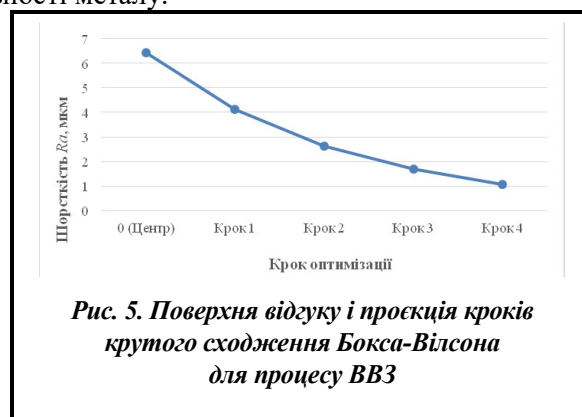


Рис. 5. Поверхня відгуку і проєкція кроків крутого сходження Бокса-Вілсона для процесу ВВЗ

Побудова траєкторії руху до екстремуму. Розрахунок уявних дослідів проводився від центра експерименту (точка нульового рівня: $t=5$ хв; $A=3$ мм; $Z=7$ мм) вздовж вектора градієнта. Результати прогнозування шорсткості наведені в табл. 4.

Таблиця 4. Результати прогнозування шорсткості методом крутого сходження

№ дослідів	Час (t), хв	Амплітуда (A), мм	Зазор (Z), мм	Прогноз R_a , мкм
Центр (0)	5,00	3,00	7,0	6,45
Крок 1	4,32	2,93	8,0	4,12
Крок 2	3,64	2,86	9,0	2,63
Крок 3	2,96	2,79	10,0	1,68
Крок 4	2,28	2,72	11,0	1,07

Використання методу крутого сходження дозволило виявити раціональну траєкторію обробки. Аналіз прогнозованих значень показує, що режим «Крок 3» (зазор 10 мм; час 3 хв) є оптимальним, оскільки забезпечує зниження шорсткості з 6,45 мкм до 1,68 мкм без ризику деструкції структури сталі 30ХГСА. Подальше збільшення енергії удару («Крок 4») може бути недоцільним через імовірність виникнення ефекту «overshoot» (перенаклепу), що потребує додаткової верифікації моделями другого порядку (CCD) для прецизійного опису зони екстремуму. Таким чином, застосований метод Бокса-Вілсона слугує інструментом для швидкого виходу в зону раціональних режимів, забезпечуючи фундамент для подальшої прецизійної автоматизації процесу ВВЗ.

Висновки

1. На основі ПФЕ типу 2^3 побудовано адекватну математичну модель формування шорсткості R_a при вібраційно-відцентровому зміцненні сталі 30ХГСА. Високий коефіцієнт кореляції ($R=0,9981$) підтверджує, що модель на 99,8% описує реальні фізичні процеси в досліджуваному діапазоні факторів.

2. Встановлено ієрархію впливу технологічних чинників на якість поверхні: домінуючим є робочий зазор (Z), збільшення якого до 10 мм забезпечує інтенсивне згладжування мікронерівностей за рахунок раціонального розподілу кінетичної енергії ударів. Фактор часу (t) має критичне значення через ризик виникнення дефектів перенаклепу при тривалості обробки понад 8 хв.

3. Кількісно оцінено ефекти взаємодії факторів (b_{23} , b_{123}), що доводить нелінійну природу процесу ВВЗ і необхідність використання моделей вищих порядків для точного прогнозування стану поверхневого шару.

4. Застосування методу крутого сходження Бокса-Вілсона дозволило обґрунтувати раціональний режим обробки: зазор 10 мм, час 3 хв, амплітуда 2,8 мм. Це забезпечує зниження середньоарифметичного відхилення профілю R_a з 6,45 мкм до 1,68 мкм, що відповідає вимогам до фінішних операцій відповідальних деталей.

5. Результати дослідження рекомендовані для використання у методиках функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів фінішного зміцнення деталей зі спеціальних сталей.

Література

- Skoczylas A., Zaleski K. Study on the surface layer properties and fatigue life of a workpiece machined by centrifugal shot peening and burnishing. *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 19. Article 6677. <https://doi.org/10.3390/ma15196677>.
- Kusyi Ya., Lychak O., Topilnytskyi V., Bošanský M. Development of the finishing and strengthening technological operations using SADT-technologies. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2019. Vol. 5. No. 3–4. P. 57–69. <https://doi.org/10.23939/ujmems2019.03-04.057>.
- Kyryliv Ya., Maksymiv O., Kyryliv V., Tsizh B., Vynar V., Yemelyanenko S. Impact of deformation force by vibration-centrifugal hardening on the properties of the surface nanostructure of steel 40Kh. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. Vol. 34. P. 29182–29192. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11450-9>.
- Kyryliv Ya., Kyryliv V., Sas N., Dutka V. Residual stresses formed by vibration-centrifugal hardening. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. Article 5189473. 7 p. <https://doi.org/10.1155/2020/5189473>.
- Stupnytskyi V., Kusyi Ya., Dragašius E., Baskutis S., Chatys R. Modeling of vibrational-centrifugal strengthening for functional surfaces of machine parts. In: Tonkonogyi V., Ivanov V., Trojanowska J., Oborskyi G., Pavlenko I. (eds.) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2023. P. 231-244. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_21.

6. Галан Ю. Я. Підвищення ефективності технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей в сипучому абразивному середовищі: дис. ... д-ра філ. ... 131 «Прикладна механіка». Тернопіль : ТНТУ, 2021. 194 с.
7. Lyashuk O., Mytnyk M., Aulin V., Lutsiv I., Tkachenko I., Galan Yu., Perenchuk O., Kondratiuk O. Mathematical model of vibration-centrifugal processing of parts using loose abrasive. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 981. P. 87-106. <https://doi.org/10.4028/p-WHu4HR>.
8. Kyryliv V. I., Kyryliv Ya. B., Sas N. Formation of surface ultrafine grain structure and their physical and mechanical characteristics using vibration-centrifugal hardening. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Article 3152170. 7 p. <https://doi.org/10.1155/2018/3152170>.
9. Гевко Б. М., Кондратюк О. М., Лящук О. Л., Марчук М. М., Серілко Л. С., Галан Ю. Я. Підвищення ефективності вібраційно-відцентрового оброблення деталей вільними абразивами. Рівне: НУВГП, 2017. 136 с.
10. Kundrák J., Mitsyk A. V., Fedorovich V. A., Markopoulos A. P., Grabchenko A. I., Kundrák J. Simulation of the circulating motion of the working medium and metal removal during multi-energy processing. *Machines*. 2021. Vol. 9. Iss. 6. Article 118. 22 p. <https://doi.org/10.3390/machines9060118>.

Надійшла до редакції 04.03.2026