

Магістерська робота

Тема:

Дослідження впливу пружності шліфувального інструменту на показники процесу шліфування деревини

Виконав студент магістр групи ДМТ-61м

Клим Володимир Петрович

Керівник доцент Петришак Ігор Васильович

Спеціальність G14 «Деревообробні та меблеві технології»

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ПЕРЕДМОВА	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ДЕРЕВИНИ	7
1.1. Технологічна сутність процесу шліфування деревини (механіка, зріз деревини зернами, контактна взаємодія)	7
1.2. Властивості абразивного інструменту та їх вплив на якість шліфування	8
– будова шкурки, зв'язки, зерна, абразивні матеріали.	8
1.3. Пружність шліфувального інструменту: чинники формування (основа шкурки, тип підкладки, товщина і твердість підкладки, механічна модель прогину та передавання тиску на поверхню)	9
1.4. Контактний тиск при шліфуванні та його роль у формуванні шорсткості	11
– фізична модель тиску, зона різання, теплонавантаження.	11
1.5. Якісні показники шліфування деревини (R_m , продуктивність, Δh – стабільність знімання)	13
1.6. Аналітичний огляд літератури щодо впливу пружності інструмента та контактного тиску на R_m і q — огляд міжнародних і українських джерел.	14
1.7. Аналіз сучасних методів дослідження процесів шліфування	16
1.8. Формування проблеми та вибір ключових факторів (x_1 — пружність інструмента (структура шкурки + підкладка + товщина/твердість) x_2 — контактний тиск p)	18
1.9. Завдання дослідження	20
1.10. Висновки до першого розділу	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	22
2.1. Матеріали та методи для розроблення регресійних моделей впливу пружності шліфувального інструмента та контактного тиску	22
2.1.1. Матеріали та устаткування для проведення досліджень	23
деревина (порода, вологість, розміри);	
абразивна шкурка (види основ, підкладок, товщини);	
стенд шліфування / плоскошліфувальний верстат;	
прилади: профілометр, ваги, індикатор годинникового типу.	
2.1.2. Змінні та постійні фактори проведення досліджень	24

Змінні (керовані): x_1 – пружність інструмента; x_2 – контактний тиск	
Постійні: порода деревини, вологість, напрям волокон, швидкість руху, початкова шорсткість, стан шкірки.	
2.1.3. Методи та методична сітка проведення досліджень	26
опис плану експерименту;	
схема варіювання x_1 та x_2 ;	
порядок проведення серій;	
вимірювання y_1, y_2 .	
2.2. Методика дослідження шорсткості поверхні R_m залежно від змінних факторів	28
2.3. Методика дослідження інтенсивності знімання та Δh залежно від змінних факторів	30
2.4. Висновок з методичного розділу	32
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ	33
3.1. Вплив основи шкірки та контактного тиску на шорсткість поверхні R_m .	33
3.2. Вплив типу підкладки та контактного тиску на шорсткість поверхні шорсткість R_m .	36
3.3. Вплив товщини та твердості підкладки та контактного тиску на шорсткість поверхні R_m .	39
3.4. Вплив основи шкірки та тиску на продуктивність q	41
3.5. Вплив типу підкладки та тиску на продуктивність q	43
3.6. Вплив товщини та твердості підкладки та тиску на продуктивність q	45
3.7. Висновки з третього розділу	47
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	49
4.1. Стан охорони праці та пожежної безпеки у шліфувальній дільниці	49
4.2. Заходи з охорони праці, техніки безпеки та екології	50
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	52
5.1. Початкові дані для розрахунку економічної ефективності	52
5.2. Розрахунок економічної ефективності	52
РОЗДІЛ 6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	56
Література	59
Додатки	60

Анотація

У магістерській роботі досліджено вплив пружності шліфувального інструмента на показники процесу шліфування деревини. Проаналізовано роль основи шліфувальної шкурки, типу, товщини та твердості підкладки, а також контактного тиску на формування шорсткості поверхні R_m та продуктивність q . Розроблено методику експериментальних досліджень та побудовано регресійні моделі другого порядку, що описують взаємозв'язок між факторними параметрами та вихідними показниками. Встановлено оптимальні режими шліфування: середня пружність інструмента та тиск 0,04 МПа для мінімізації R_m , а також жорсткі основи та тиск 0,06 МПа для забезпечення максимальної інтенсивності знімання. Проведена економічна оцінка довела доцільність впровадження оптимізованих режимів, що забезпечують економію до 6 грн/м² та потенційний річний ефект близько 120 тис. грн. Сформульовано практичні рекомендації щодо застосування оптимальних параметрів у деревообробному виробництві.

Ключові слова: шліфування деревини, пружність інструмента, шліфувальна шкурка, підкладка, контактний тиск, шорсткість R_m , продуктивність q , регресійна модель, оптимізація режимів, економічна ефективність.

Abstract

The master's thesis investigates the influence of sanding tool elasticity on key performance parameters of the wood sanding process. The study analyzes the role of abrasive backing type, pad material, pad thickness and hardness, as well as contact pressure in determining surface roughness R_m and the material removal rate q . An experimental methodology was developed, and second-order regression models were constructed to describe the relationships between process parameters and output indicators. Optimal sanding conditions were identified: medium tool elasticity and a pressure of 0.04 MPa for minimizing R_m , and rigid abrasive backings with 0.06 MPa pressure for maximizing material removal rate. Economic evaluation demonstrated the feasibility and efficiency of applying optimized parameters, resulting in savings of up to 6 UAH/m² and a potential annual benefit of approximately 120,000 UAH. Practical recommendations for implementing the optimized sanding conditions in industrial wood processing are provided.

Keywords: wood sanding, tool elasticity, abrasive backing, sanding pad, contact pressure, surface roughness R_m , removal rate q , regression model, process optimization, economic efficiency.

ПЕРЕДМОВА

Процес шліфування є одним із завершальних та найбільш відповідальних етапів механічної обробки деревини, оскільки саме він формує кінцеву якість поверхні, забезпечує необхідні експлуатаційні властивості та визначає рівень подальшої обробки — лакування, фарбування або нанесення декоративних покриттів. Ефективність шліфування значною мірою залежить від властивостей абразивного інструменту та параметрів взаємодії між інструментом і деревиною.

Одним із ключових, але недостатньо досліджених факторів є пружність шліфувального інструменту. Вона визначається конструкцією шкурки, основою, типом і характеристиками підкладки та впливає на формування реального контактного тиску, характер мікрорізання, стабільність знімання та шорсткість обробленої поверхні. Незважаючи на широке застосування шліфувальних матеріалів різних типів, питання впливу їх пружності на якісні та продуктивні показники процесу залишається відкритим, особливо щодо можливості кількісного опису цих залежностей.

Мета цієї роботи — встановлення закономірностей впливу пружності шліфувального інструменту та контактного тиску на параметри процесу шліфування деревини. У магістерській роботі послідовно проведено аналіз сучасного стану питання, сформовано систему вхідних і вихідних факторів, розроблено методику експериментальних досліджень, побудовано регресійні моделі, що описують вплив досліджуваних факторів на шорсткість поверхні та інтенсивність знімання деревини.

Робота спрямована на розв'язання актуальної науково-практичної задачі — підвищення ефективності та керованості процесу шліфування деревини завдяки оптимальному вибору конструкції шліфувального інструменту та режимів навантаження.

ВСТУП

Шліфування є важливим завершальним етапом деревообробних технологічних процесів, що визначає якість поверхні заготовок, їх придатність до подальшого оздоблення та експлуатаційні властивості готових виробів. Сучасні технології машинної обробки деревини висувають підвищені вимоги до параметрів шорсткості, стабільності знімання матеріалу та продуктивності шліфування. Досягнення цих параметрів неможливе без глибокого розуміння механізмів взаємодії абразивного інструменту з деревиною.

Одним із ключових, але недостатньо вивчених факторів, що визначає ефективність шліфування, є **пружність шліфувального інструменту**, яка формується основою шліфувальної шкурки, типом підкладки, її товщиною та твердістю. Пружні властивості інструмента впливають на реальний контактний тиск, форму зон мікрорізання, величину та стабільність знімання деревини, а також на параметри шорсткості поверхні. У виробничій практиці використовують інструменти з різними характеристиками пружності, однак кількісні закономірності їх впливу на процес шліфування залишаються недостатньо визначеними. Це створює труднощі при виборі конструкції інструменту та оптимізації режимів.

Тому дослідження впливу пружності шліфувального інструменту в поєднанні з контактним тиском є актуальною науковою та практично значущою задачею, що дозволяє підвищити якість обробки та продуктивність технологічних процесів у деревообробній промисловості.

Об'єкт дослідження – Процес машинного шліфування деревини.

Предмет дослідження – Закономірності впливу пружності шліфувального інструменту та контактного тиску на параметри процесу шліфування деревини.

Мета роботи – Встановлення кількісних залежностей між пружністю шліфувального інструменту, контактним тиском та показниками процесу шліфування деревини (шорсткістю поверхні та інтенсивністю знімання матеріалу) для підвищення ефективності та керованості технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Провести аналіз сучасного стану питання щодо впливу властивостей абразивного інструменту та режимів шліфування на якісні та продуктивні показники обробки деревини.

2. Визначити систему вхідних та вихідних параметрів дослідження, сформулювати змінні та постійні фактори впливу.

3. Розробити методичку та методичну сітку проведення експериментальних досліджень впливу пружності інструменту та контактного тиску на показники процесу шліфування.

4. Провести експериментальні дослідження шорсткості поверхні та інтенсивності знімання деревини за різних значень пружності інструмента та контактного тиску.

5. Побудувати регресійні моделі впливу досліджуваних факторів на показники процесу шліфування.

6. Виконати аналіз отриманих залежностей та визначити оптимальні параметри пружності інструмента і контактного тиску.

7. Розробити практичні рекомендації щодо вибору конструкції абразивного інструменту та режимів шліфування.

Наукова новизна – Уперше встановлено кількісні залежності між компонентами пружності шліфувального інструменту (основа шкурки, тип підкладки, її товщина та твердість), контактним тиском та параметрами процесу шліфування деревини, що дозволяє кількісно описати вплив пружних властивостей інструмента на формування шорсткості поверхні і стабільність знімання матеріалу.

Практичне значення роботи – тримані результати дають можливість:

- підвищити якість шліфування деревини шляхом раціонального вибору конструкції абразивного інструменту;
- оптимізувати контактний тиск для забезпечення стабільної продуктивності та необхідної шорсткості;
- вдосконалити режими машинного шліфування на деревообробних підприємствах.

Методи дослідження – Експериментальні методи визначення R_m та інтенсивності знімання деревини; вимірювання прогину та пружних характеристик інструмента; математичне моделювання; регресійний аналіз; методи оптимізації технологічних параметрів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ДЕРЕВИНИ

1.1. Технологічна сутність процесу шліфування деревини

Шліфування деревини є процесом тонкого знімання матеріалу абразивним інструментом з метою отримання рівної та чистої поверхні, придатної до подальшої обробки або оздоблення. На відміну від інших видів механічної обробки, шліфування характеризується малими глибинами різання, великою кількістю активних ріжучих зерен та складною динамікою контактної взаємодії між інструментом і поверхнею деревини.

У процесі шліфування кожне абразивне зерно діє як мікрорізець, що занурюється у деревину під дією контактної тиску. Глибина прорізання зерна визначається не лише навантаженням, а й пружністю інструмента, яка формує реальний розподіл тиску в зоні контакту. Залежно від цих параметрів зерна або зрізають мікрочастинки деревини, або ковзають із частковим руйнуванням поверхневих шарів, що впливає на параметри шорсткості R_m , R_z та стабільність знімання матеріалу.

Процес шліфування поєднує два взаємопов'язані механізми:

1. мікрорізання, коли зерна інтенсивно зрізають дрібні частинки деревини;
2. мікропластичне деформування, коли частина деревини стискається, зминається або роздирається вздовж волокон.

Співвідношення цих механізмів визначає якість поверхні та продуктивність обробки. При надмірній пружності інструмента реальний контактний тиск знижується, що не дає зернам достатньо заглиблюватись у матеріал, спричиняючи переважання ковзання та підвищення шорсткості. За надто жорсткого інструмента навантаження може бути надмірним, що спричиняє утворення глибоких подряпин і нерівномірність знімання.

Шліфування деревини є процесом з високоанізотропною природою, оскільки структура деревини (наявність річних шарів, різна твердість ранньої та пізньої деревини, напрям волокон) суттєво впливає на механізми мікрорізання. У зв'язку з цим досягнення рівномірної шорсткості поверхні вимагає точного контролю параметрів інструмента та режимів навантаження.

До основних технологічних параметрів процесу шліфування відносять:

- контактний тиск між інструментом і поверхнею;
- швидкість відносного руху;
- зернистість абразиву;
- пружність інструмента та підкладки;
- стан і знос шліфувального матеріалу;
- напрямок обробки відносно волокон деревини.

Взаємодія цих параметрів формує результуючі показники процесу: шорсткість R_m та інтенсивність знімання деревини (продуктивність) q . У реальних виробничих умовах значна частина відхилень якості шліфування пов'язана саме

зі зміною пружних властивостей інструмента, що впливають на розподіл тиску і траєкторії руху зерен у зоні контакту.

Отже, технологічна сутність процесу шліфування полягає у складній взаємодії абразивних мікрорізців із деревиною, яка визначається як матеріальною структурою інструмента, так і умовами навантаження. Це робить дослідження впливу пружності інструмента та контактного тиску на результати шліфування актуальним і необхідним для удосконалення технологій механічної обробки деревини.

1.2. Властивості абразивного інструменту та їх вплив на якість шліфування

Абразивний інструмент для шліфування деревини являє собою багатокомпонентну систему, яка складається з абразивних зерен, основи (носія) та підкладки, що визначає механічні, пружні та робочі характеристики інструмента. Кожен із цих елементів впливає на процес контактної взаємодії та формування якості обробленої поверхні.

Абразивні зерна

Абразивне зерно є основним робочим елементом шліфувального інструмента. На деревині застосовують такі матеріали: електрокорунд нормальний і цирконієвий; карбід кремнію; керамічні композиційні абразиви.

Властивості зерен, що впливають на результати шліфування: твердість — визначає здатність утримувати гостроту різання; форма і гострота вершини — впливають на глибину проникнення у деревину; розмір (зернистість) — визначає величину сліду після шліфування; міцність зерна — впливає на його руйнування і самооновлення поверхні.

Зменшення розміру зерна приводить до формування більш рівномірного сліду і зниження R_m , проте зменшує продуктивність через меншу глибину різання.

Зв'язка абразивних зерен

Абразив прикріплюється до основи за допомогою клеїв, смол або лаків:

- натуральні клеї;
- синтетичні смолисті зв'язки (переважно фенолоформальдегідні).

Тип зв'язки визначає: жорсткість поверхневого шару; стійкість зерен до випадання; здатність інструмента протистояти забиванню деревним пилом.

Жорстка зв'язка забезпечує стабільність різання, але знижує адаптацію інструмента до нерівностей поверхні.

Основа шліфувальної шкурки

Основа виконує конструктивну функцію та формує базові механічні властивості інструмента. Найпоширеніші типи основ: паперова основа — легка, малопружна, забезпечує жорстке шліфування; бавовняна або поліестрова тканинна основа — міцна та еластична; комбінована основа (папір + тканина) — забезпечує баланс міцності й гнучкості; фібра — жорстка і міцна, характерна для дискових шкурок.

Основні характеристики основи, що впливають на процес: товщина та пружність; міцність на розтяг та вигин; жорсткість у поперечному напрямку.

Більш жорстка основа зменшує здатність зерен копіювати мікронерівності, що може збільшувати R_m .

Підкладка під шліфувальною шкуркою

Підкладка модифікує пружність інструмента та розподіл контактного тиску. Використовують:

- стальну або алюмінієву плиту — жорсткий інструмент;
- гуму, спінену поліуретанову основу, повсть — еластичні підкладки;
- шліфувальну губку — тонкий високопружний прошарок.

Ключові параметри підкладки: тип матеріалу (еластичність, модуль пружності); товщина підкладки; твердість .

Зі збільшенням товщини та зменшенням твердості підкладки реальний контактний тиск зменшується, зона контакту розширюється, а процес різання переходить до переважно пластичного деформування.

Комплексний вплив конструкції абразивного інструменту

Поєднання основи, підкладки та абразиву визначає такі показники: пружність інструмента; стабільність знімання деревини; тепловантаження поверхні; схильність до забивання пилом; параметри шорсткості R_m .

Важливим є те, що різні за конструкцією шліфувальні матеріали можуть забезпечувати однакову зернистість, але суттєво різнитися за результатами обробки через різну пружність системи “основа + зв`язка + підкладка”.

Вплив властивостей інструменту на показники процесу

1. Жорсткий інструмент

- забезпечує високу продуктивність,
- але дає глибший слід і вищу R_m .

2. Середньоеластичний інструмент

- формує рівномірний слід,
- забезпечує оптимальний баланс між R_m та q .

3. М'який інструмент

- копіює нерівності поверхні,
- зменшує реальний тиск,
- що може збільшувати R_m та знижувати стабільність знімання.

Таким чином, характеристики абразивного інструменту визначають механізми мікрорізання, параметри шорсткості поверхні та продуктивність процесу шліфування. Для глибокого аналізу важливим є дослідження не лише зернистості чи типу основи, а саме пружності інструмента як інтегрального показника, що залежить від конструкційних компонентів шкурки і підкладки.

1.3. Пружність шліфувального інструменту: чинники формування

Пружність шліфувального інструменту є комплексною характеристикою, що описує здатність абразивного матеріалу та підкладки деформуватися під дією зовнішнього навантаження і відновлювати свою форму після зняття навантаження. Саме пружні властивості визначають реальний контактний тиск, конфігурацію зони дотику інструмента з деревиною, глибину проникнення абразивних зерен та характер формування шліфованої поверхні.

На відміну від геометричних параметрів або зернистості абразиву, пружність є інтегральною властивістю, яка залежить від сукупності конструкційних елементів інструмента:

- основи шліфувальної шкірки,
- типу та матеріалу підкладки,
- товщини та твердості підкладки,
- будови і структури абразивного шару.

Усі ці складові змінюють модуль пружності системи «шкірка – підкладка», який безпосередньо впливає на формування процесу шліфування.

Основні чинники, що визначають пружність шліфувального інструмента

1. Основа шліфувальної шкірки

Основа є несучим елементом, який забезпечує механічну міцність та визначає початкову жорсткість інструмента. У промисловості використовують:

- паперову основу – низька пружність, висока жорсткість;
- бавовняну тканину – еластичність і підвищена здатність до згину;
- поліестрову тканину – висока міцність, стабільна еластичність;
- фібру – дуже високу жорсткість, характерну для дискових інструментів;
- комбіновані основи – поєднання жорсткості та гнучкості.

Гнучка основа сприяє розширенню зони контакту та зменшенню локального тиску, тоді як жорстка забезпечує більшу глибину різання та вищу продуктивність.

2. Наявність і тип підкладки під шліфувальною шкіркою

Підкладка відіграє ключову роль у формуванні пружних властивостей інструмента. Її матеріал визначає величину пружної деформації під час навантаження. Основні види:

- сталева або алюмінієва плита – практично відсутня пружність → жорстке шліфування;
- гумова підкладка – середня пружність, рівномірний розподіл тиску;
- поліуретанова губка – висока пружність, м'яке шліфування;
- повсть – адаптивна структура, достатня еластичність при середній стабільності;
- спінені полімерні матеріали – дуже висока піддатливість.

Від типу підкладки залежить, чи буде процес відбуватися переважно через мікрорізання або ковзання, а також якість формованої поверхні.

3. Товщина та твердість підкладки

Ці характеристики визначають робочу глибину пружної деформації інструмента.

- Товща підкладка → більший прогин → нижчий тиск → більше ковзання → вища R_m .
- Тонка підкладка → менший прогин → вищий тиск → глибше різання → менша R_m , але більша небезпека утворення подряпин.

Твердість вимірюють у одиницях Шора (ShA або ShD):

- висока твердість (ShD) → жорсткіша система;
- низька твердість (ShA) → м'якіша, більш адаптивна система.

Оптимальне співвідношення товщини і твердості дозволяє мінімізувати дефекти поверхні та забезпечити стабільність продуктивності.

4. Структура абразивного шару

Хоча зернистість сама по собі не визначає пружність, проте впливає на її прояв у зоні різання:

- щільність покриття
- жорсткість зв'язки
- висота абразивного зернового виступу

Жорстка зв'язка підвищує загальну жорсткість інструмента, тоді як м'яка – сприяє дисипації навантаження.

Загальна модель формування пружності

Пружність інструмента можна представити як функцію:

$$E_{\text{еф}} = f(E_{\text{осн}}, E_{\text{підкл}}, h_{\text{підкл}}, H_{\text{тверд}}, \text{структури, абразиву})$$

Де

- $E_{\text{еф}}$ – ефективний модуль пружності системи «шкурка–підкладка»;
- $E_{\text{осн}}$ – модуль і жорсткість основи;
- $E_{\text{підкл}}$ – модуль підкладки;
- $h_{\text{підкл}}$ – товщина підкладки;
- $H_{\text{тверд}}$ – твердість підкладки.

Формально пружність у дослідях можна виражати через прогин інструмента під заданим навантаженням, тобто у вигляді кількісного показника, що дозволяє ввести її в систему факторів як змінну x_1 .

Вплив пружності на процес шліфування

Пружність інструмента визначає:

- реальний контактний тиск (жорсткий інструмент → високий тиск; м'який → низький)
- глибину проникнення зерен (впливає на R_m та продуктивність q)
- розподіл навантаження на мікронерівності
- теплонавантаження поверхні
- копіювання структури деревини (м'які інструменти сильніше повторюють річні шари)

У підсумку пружність виступає одним із головних факторів, що визначають якість процесу шліфування та параметри R_m і q .

1.4. Контактний тиск при шліфуванні та його роль у формуванні якості поверхні

Контактний тиск є одним із ключових параметрів процесу шліфування, оскільки саме він визначає глибину проникнення абразивних зерен у деревину, інтенсивність мікрорізання, характер утворення стружки та формування параметрів шорсткості. У поєднанні з пружністю інструмента контактний тиск формує реальну зону контакту та значною мірою визначає ефективність процесу.

Природа контактного тиску в процесі шліфування

У зоні шліфування діє сумарне навантаження від інструмента, яке розподіляється нерівномірно через:

- неоднорідність деревини (річні шари, волокниста структура, відмінності твердості);
- геометрію зерен та їх стохастичне розташування;
- пружну деформацію шліфувальної шкурки і підкладки;
- коливання та мікрорухи інструмента під час роботи.

Тому реальний контактний тиск завжди відрізняється від номінального, заданого оператором або механізмом притиску. Номінальний тиск визначає початкове навантаження, а ефективний — формується в зоні різання і залежить від пружності інструмента.

Вплив контактного тиску на глибину різання

Глибина проникнення окремого зерна у деревину визначається рівнянням:

$h=f(p, \text{ пружність інструмента, геометрія зерна})$ підвищення тиску збільшує глибину різання, що сприяє:

- інтенсивному утворенню стружки,
- зростанню продуктивності,
- формуванню більш глибокого сліду від зерна,
- підвищенню R_m та R_z при надмірному навантаженні.

При низькому тиску зерна частіше ковзають поверхнею, що призводить до:

- недорізання,
- мікропластичного деформування деревини,
- появи «змінання» або розшарування ранньої деревини,
- збільшення шорсткості.

Оптимальний діапазон тиску забезпечує стійке мікрорізання без переходу до ковзання.

Вплив тиску на зону контакту та форму взаємодії

У системах «жорстка основа – жорстка підкладка» зона контакту вузька, а тиск концентрується в малих точках. Це сприяє більш агресивному зняттю матеріалу.

У системах «еластична основа – м'яка підкладка» зона контакту розширюється, а тиск розподіляється рівномірніше, що:

- зменшує глибину різання;
- збільшує довжину траєкторії ковзання зерна;
- підвищує ймовірність мікропластичної деформації;
- може збільшувати R_m .

Таким чином, контактний тиск і пружність інструмента формують спільний вплив на механізми мікрорізання.

Теплонавантаження та його залежність від тиску

Підвищення контактного тиску збільшує:

- силу тертя в зоні контакту;
- нагрів поверхні деревини;
- ризик термічних пошкоджень (підпалин, потемніння);
- швидкість забивання абразиву.

Підвищений тиск особливо небезпечний при шліфуванні твердих порід деревини або при використанні м'яких підкладок, які гірше відводять тепло.

Взаємодія тиску та властивостей деревини

Деревина є анізотропним матеріалом, тому:

- тиск по-різному впливає на ранню та пізню деревину;
- у напрямку вздовж волокон зростає схильність до розшаровування при надмірному навантаженні;
- при шліфуванні поперек волокон збільшується чутливість до зміни тиску. Нерівномірність структури деревини робить контроль контактного тиску одним із ключових умов забезпечення стабільності R_m .

Загальний вплив контактного тиску на результати шліфування

1. На шорсткість поверхні R_m
 - низький тиск → переважно ковзання → підвищення R_m ;
 - оптимальний тиск → стабільне мікрорізання → мінімум R_m ;
 - високий тиск → глибокі борозни → підвищення R_m .
2. На інтенсивність знімання q
 - зі збільшенням тиску q зростає до певної межі, після чого стабілізується або зменшується через забивання абразиву.
3. На стабільність Δh
 - занадто малий тиск призводить до нерівномірного знімання;
 - надмірний — до появи локальних заглиблень.

Отже, контроль контактного тиску є важливою умовою керування параметрами шліфування, а його вплив нерозривно пов'язаний із пружністю інструмента, що підтверджує доцільність комплексного дослідження цих факторів.

1.5. Якісні показники шліфування деревини

Оцінювання якості процесу шліфування деревини здійснюється за комплексом параметрів, які характеризують стан обробленої поверхні, рівномірність знімання матеріалу та ефективність роботи абразивного інструмента. Основними показниками, що відображають результат шліфування та використовуються у технологічних дослідженнях, є параметри шорсткості поверхні, інтенсивність знімання деревини та зміна товщини заготовки.

1.5.1. Параметр шорсткості поверхні R_m

Параметр R_m є середньоарифметичним відхиленням профілю поверхні від середньої лінії та є найбільш інформативним показником якості шліфування деревини. R_m відображає:

- рівномірність процесу мікрорізання;
- характер борозен, утворених абразивними зернами;
- вплив пружності інструмента та контактного тиску на глибину мікрорізання;
- ступінь пластичного деформування поверхневих шарів деревини.

Зменшення параметра R_m свідчить про раціональні режими шліфування та ефективний вибір конструкції інструмента. У промислових умовах оптимальні значення R_m лежать у межах 3–12 мкм залежно від породи деревини та вимог до подальшого оздоблення.

1.5.2. Інші параметри шорсткості (R_z , R_{max})

Хоча основним у дослідженні є R_m , додатково часто застосовують параметри: R_z – висота нерівностей профілю за п'ятьма точками; R_{max} – найбільша висота мікронерівності.

Ці параметри особливо важливі при оцінці: появи глибоких рисок, пошкодження структури деревини при високому тиску, нераціональної взаємодії пружного інструмента з ранньою та пізньою деревиною.

R_z більш чутливий до локальних дефектів поверхні, тоді як R_m є інтегральним показником.

1.5.3. Інтенсивність знімання деревини (q)

Інтенсивність знімання деревини характеризує кількість матеріалу, яка знімається з поверхні заготовки за одиницю часу або за одиницю площі. Цей показник визначається як:

$$q = (m_{до} - m_{після}) / t \quad \text{або} \quad q = (m_{до} - m_{після}) / (A \cdot t),$$

де: $m_{до}$, $m_{після}$ – маса заготовки до та після шліфування; t – час шліфування; A – площа шліфованої поверхні.

Інтенсивність знімання відображає: ефективність роботи абразивного інструмента; глибину мікрорізання; вплив контактного тиску на продуктивність; пружність інструмента, яка визначає реальний розподіл тиску.

Занадто низька q свідчить про ковзання зерен, тоді як надмірно висока q може бути ознакою нерівномірного різання та ризику утворення подряпин.

1.5.4. Зміна товщини заготовки Δh

Зміна товщини заготовки після шліфування (Δh) використовується як показник: рівномірності знімання матеріалу; стабільності глибини різання; адекватності вибраного контактного тиску; впливу пружності інструмента на геометричну точність.

При шліфуванні надто м'яким інструментом збільшується копіювання мікронерівностей, що знижує стабільність Δh . При надмірно жорстких інструментах виникають локальні заглиблення та збільшення нерівномірності знімання.

Показник Δh є важливим при виробництві деталей, де необхідна точна геометрія та мінімальна зміна товщини після шліфування (наприклад, у меблевому та столярному виробництві).

1.5.5. Комплексна оцінка якості шліфування

Оцінювання процесу шліфування здійснюється за сукупністю показників:

- R_m — критерій чистоти поверхні;
- R_z або R_{max} — чутливі до локальних дефектів;
- q — оцінка продуктивності;
- Δh — стабільність знімання та геометрична точність.

Оптимальне шліфування — це мінімальні R_m та Δh при стабільній, але не надмірній інтенсивності знімання q .

1.6. Аналітичний огляд літератури щодо впливу пружності інструмента та контактної тиску на показники процесу шліфування деревини

Питання впливу властивостей абразивного інструмента та режимів шліфування на якість поверхні деревини досліджувалося багатьма авторами,

проте більшість робіт фокусується на зернистості, швидкості та типах абразивів, тоді як роль пружності інструмента та її взаємодія з контактним тиском залишається недостатньо висвітленою. У наукових джерелах можна виділити кілька ключових напрямів дослідження.

1.6.1. Дослідження механізмів мікрорізання та формування шорсткості

Ряд робіт (Kivimaa, Stewart, Atkins) описують шліфування як процес мікрорізання, в якому глибина проникнення зерен визначає структуру мікропрофілю. Автори встановили, що: збільшення контактного тиску сприяє зростанню глибини різання; зменшення тиску переводить процес від різання до ковзання; кінцевий профіль поверхні суттєво залежить від механічних властивостей деревини.

Проте вплив пружності абразивного інструмента, що коригує реальне значення тиску в зоні контакту, у цих роботах майже не розглядається.

1.6.2. Дослідження впливу зернистості та типу абразиву

Відомі дослідження Saloni, Lemaster, AguileRm та інших показали, що: зменшення зернистості приводить до зниження Rm; керамічні абразиви забезпечують більш стабільне різання; властивості зв'язки впливають на здатність інструмента до самооновлення.

Однак зернистість розглядається окремо від пружних властивостей системи «шкурка–підкладка», хоча в реальному процесі ці параметри взаємодіють.

1.6.3. Дослідження конструкцій абразивних інструментів

У ряді робіт (Oščajová, SikoRm, Kvietková та ін.) досліджено вплив: типу основи шкурки (папір, тканина, фібра), щільності покриття зерном, жорсткості зв'язки — на утворення мікрорельєфу.

Автори зазначають, що більш гнучкі інструменти краще адаптуються до рельєфу деревини, що зменшує локальні дефекти поверхні, однак можливе збільшення Rm через зменшення глибини проникнення зерен.

Питання кількісного оцінювання пружності в цих роботах практично не розкривається.

1.6.4. Вплив підкладки на розподіл тиску

Деякі дослідження (Hernandez, Rmtnasingam) вказують на те, що: м'які шліфувальні підкладки збільшують площу контакту; це зменшує реальний контактний тиск; зменшення тиску викликає зниження глибини різання і зростання шорсткості. Дослідження демонструють, що пружна підкладка відіграє визначальну роль у формуванні Rm, але кількісні моделі, що описують цей вплив, не подаються.

1.6.5. Дослідження контактного тиску при шліфуванні

В роботах Johansson, Górecki, Wilkowski встановлено, що: збільшення тиску лінійно підвищує продуктивність до певної межі; подальше зростання тиску зумовлює появу глибоких борозен; надмірний тиск спричиняє підпалини та забивання абразиву.

Однак автори не пов'язують отримані результати із пружними характеристиками інструмента, хоча саме пружність визначає фактичний тиск у зоні контакту.

1.6.6. Комплексні дослідження пружності інструмента

Наявні дослідження пружності інструмента обмежуються окремими аспектами: вимірювання прогину шліфувальної стрічки; аналіз впливу жорсткості підкладки на дефекти; визначення впливу гнучкості основи на копіювання рельєфу. Більшість робіт описує результати якісно, без математичної моделі чи регресійного аналізу. Кількісні залежності між пружністю, контактним тиском та параметрами R_m і q практично відсутні, що обумовлює актуальність даної магістерської роботи.

1.6.7. Висновки за результатами аналізу літературних джерел

Огляд наукових праць показує, що:

1. Відомі закономірності впливу контактного тиску на глибину різання та продуктивність, але роль пружності інструмента не розкрита належним чином.

2. Є окремі відомості про вплив основи шкурки та підкладки на якість поверхні, але відсутні комплексні дослідження з урахуванням їх взаємодії з тиском.

3. Практично відсутні математичні моделі, що описують зв'язок між конструкційними параметрами інструмента (основа, тип підкладки, товщина, твердість), реальним контактним тиском та вихідними показниками процесу шліфування.

4. Наявні дослідження не дозволяють однозначно встановити оптимальні значення пружності інструмента для забезпечення мінімальної R_m та стабільної продуктивності.

Таким чином, існує наукова прогалина, яку заповнює дана магістерська робота — комплексне дослідження впливу пружності шліфувального інструмента та контактного тиску на параметри процесу шліфування деревини з побудовою регресійних моделей.

1.7. Аналіз сучасних методів дослідження процесів шліфування деревини

Дослідження процесів шліфування деревини ґрунтується на поєднанні експериментальних, теоретичних та аналітичних методів, що дозволяють визначити характер взаємодії абразивного інструмента з деревиною, оцінити вплив технологічних факторів на якісні показники та оптимізувати режими обробки. Сучасні методи можна умовно поділити на три групи: методи вимірювання параметрів поверхні, методи визначення параметрів процесу та математичні та статистичні методи аналізу.

1.7.1. Методи вимірювання параметрів шорсткості

Оцінка шорсткості поверхні є основним способом контролю якості шліфування. Використовують такі методи:

Контактні профілометричні методи. Застосовуються голчасті індуктивні або механічні профілометри, які дозволяють визначати велику кількість параметрів профілю (R_m , R_z , R_{max} , R_t). Переваги: висока точність; можливість оцінки мікроструктури; широке застосування в деревообробці.

Обмеження: можливий вплив структури деревини на рух голки при різкій зміні твердості річних шарів.

Оптичні методи. Використовують лазерні сканери або оптичні 3D-профілометри. Переваги: безконтактність; можливість аналізу мікрорельєфу; висока швидкість вимірювання. Недоліки: потребують калібрування під матеріали зі змінними оптичними властивостями.

1.7.2. Методи визначення інтенсивності знімання та стабільності глибини різання

В експериментальних дослідженнях застосовують такі методи:

Гравіметричний метод

Визначення маси заготовки до і після шліфування з наступним розрахунком q . Метод простий і точний, широко застосовується у наукових роботах.

Метод вимірювання товщини (Δh)

Використовують індикатори, мікрометри або оптичні засоби для оцінки зміни товщини деталі після шліфування. Дає уявлення про:

- рівномірність знімання;
- стабільність глибини мікрорізання;
- вплив пружності інструмента.

Методи оцінки зносу та забивання абразиву

Оптичний аналіз забивання зерен застосовується для визначення впливу режимів та тиску на ефективність різання.

1.7.3. Методи оцінки пружності шліфувального інструмента

Пружність абразивного інструмента досліджують такими основними методами:

Метод прогину під навантаженням

Полягає у вимірюванні переміщення вільного кінця смужки шліфувальної шкурки або інструмента з підкладкою під дією заданої сили. Є простим та ефективним способом кількісного визначення інструментальної пружності.

Метод визначення модуля пружності матеріалів підкладки

Використовуються стандартні механічні випробування (деформація стиску, згину). Забезпечує високу точність, але вимагає спеціального обладнання.

Метод інструментального притиску

Оцінка пружних властивостей інструмента безпосередньо в зоні шліфування шляхом вимірювання реакції на навантаження. Дає найбільш реалістичну картину, але складніший в реалізації.

У більшості наукових праць методи оцінки пружності використовуються фрагментарно, без подальшої побудови математичних залежностей між пружністю та результатами шліфування.

1.7.4. Методи математичного аналізу та моделювання процесу шліфування

Сучасні дослідження широко застосовують математичні методи для аналізу впливу технологічних факторів:

Регресійне моделювання

Дозволяє отримати залежності між:

- вхідними факторами (пружність інструмента, контактний тиск),
- та вихідними показниками (R_m , q , Δh).

Регресійні моделі забезпечують:

- можливість прогнозування результатів;

- визначення значущості факторів;
- побудову поверхонь відгуку.

Методи планування експерименту

(центрально-композиційне планування, повний або дробовий факторний експеримент)

Дозволяють:

- зменшити кількість дослідів;
- забезпечити статистичну достовірність;
- отримати дані для коректної побудови моделей.

Методи статистичного аналізу

- дисперсійний аналіз (ANOVA);
- оцінка коефіцієнтів регресії;
- перевірка адекватності моделей.

1.7.5. Висновки щодо сучасних методів дослідження

Аналіз показує, що для комплексного дослідження впливу пружності інструмента та контактного тиску доцільно застосовувати комбіновану методику:

- контактні або оптичні методи вимірювання R_m ;
- гравіметричний метод визначення q ;
- індикаторні методи вимірювання Δh ;
- метод прогину під навантаженням для визначення пружності;
- регресійне моделювання для опису залежностей.

Більшість сучасних робіт не дають системної картини взаємодії «пружність – контактний тиск – якість поверхні», що обґрунтовує необхідність проведення комплексного експериментального дослідження у даній магістерській роботі.

1.8. Формування проблеми дослідження та вибір ключових факторів впливу

Аналіз літературних джерел, сучасних методів досліджень та теоретичних основ процесу шліфування деревини показав, що результати шліфування значною мірою визначаються механічними властивостями абразивного інструмента та умовами навантаження в зоні контакту. Серед усіх чинників найбільший практичний вплив мають пружність інструмента та контактний тиск, які взаємодіють між собою і формують глибину мікрорізання, тип взаємодії зерен із деревиною та параметри шорсткості поверхні.

У наукових роботах наявні дані про вплив зернистості, типу абразиву та швидкості обробки, однак комплексних досліджень пружності інструмента у зв'язку з режимами навантаження практично немає. При цьому виробничий досвід показує, що зміни в пружних властивостях можуть: змінювати реальний контактний тиск; викликати нестабільність знімання матеріалу; сприяти появі глибоких рисок або змінання структури деревини; суттєво впливати на параметр шорсткості R_m ; визначати продуктивність процесу.

Отже, існує об'єктивна необхідність встановлення кількісних залежностей між пружністю інструмента, контактним тиском та вихідними показниками шліфування.

1.8.1. Вибір ключових змінних факторів

На основі теоретичного аналізу сформовано дві групи факторів: змінні (керовані) та постійні (фіксовані).

Змінні фактори (керовані) – основа експерименту

1. x_1 – пружність шліфувального інструмента, яка визначається: типом основи шліфувальної шкурки (папір, тканина, фібра); наявністю та видом підкладки (сталева плита, гума, поліуретанова губка, повсть); товщиною підкладки; твердістю підкладки.

Пружність виступає інтегральною характеристикою, яка у досліджах може бути виражена через прогин інструмента під дією заданого навантаження, що дозволяє кількісно оцінювати її вплив.

2. x_2 – контактний тиск на поверхню деревини, МПа (H/cm^2). Тиск визначає глибину проникнення зерен у деревину та продуктивність мікрорізання.

Ці два фактори є домінуючими, оскільки вони формують основні механізми взаємодії інструмента з матеріалом.

1.8.2. Постійні фактори (фіксовані умови)

Для забезпечення коректності експерименту всі інші параметри процесу утримуються постійними, зокрема: порода деревини та її вологість; напрям волокон; початкова підготовка зразків; зернистість абразиву (фіксована або вибрана для серії дослідів); швидкість подачі або колова швидкість; температура та умови середовища; стан шкурки (нова, без забивання).

Фіксація цих параметрів дозволяє ізолювати вплив саме досліджуваних факторів x_1 та x_2 .

1.8.3. Вибір вихідних показників процесу

Для кількісної оцінки результатів шліфування обрано три ключові показники:

1. y_1 – параметр шорсткості R_m , мкм Основний критерій якості шліфованої поверхні.

2. y_2 – інтенсивність знімання деревини q , г/хв або $\text{г}/\text{см}^2 \cdot \text{хв}$ Використовується для оцінки продуктивності процесу.

3. Δh – зміна товщини заготовки після шліфування, мм Показник стабільності знімання та геометричної точності.

Вибір цих показників забезпечує можливість комплексної оцінки ефективності процесу та побудови регресійних моделей.

1.8.4. Сформована наукова проблема

На основі проведеного аналізу науково-прикладна проблема формулюється так:

Необхідно встановити кількісні залежності між пружністю шліфувального інструмента, контактним тиском та показниками процесу шліфування деревини (R_m , q), що дозволить підвищити ефективність технології та забезпечити оптимальну якість обробленої поверхні.

1.9. Задачі дослідження

На основі аналізу стану питання, виявлених наукових прогалин та сформованої проблеми дослідження визначено такі основні задачі, вирішення яких забезпечує досягнення мети магістерської роботи:

1. Провести аналітичний огляд теоретичних і експериментальних досліджень процесу шліфування деревини, з особливою увагою до впливу конструкційних особливостей абразивного інструмента та режимів навантаження.

2. Встановити фактори, що визначають пружність шліфувального інструмента, зокрема вплив основи шліфувальної шкурки, типу підкладки, її товщини та твердості.

3. Обґрунтувати вибір змінних факторів дослідження — пружності інструмента (x_1) і контактного тиску (x_2), а також визначити перелік постійних технологічних параметрів, що підлягають фіксації під час експерименту.

4. Сформулювати систему вихідних показників, які відображають результати процесу шліфування деревини: параметр шорсткості R_m (y_1), та інтенсивність знімання q (y_2).

5. Розробити методику проведення експериментальних досліджень, що включає: – добір матеріалів та обладнання; – визначення способу оцінювання пружності інструмента; – встановлення режимів навантаження; – методи вимірювання R_m , q .

6. Провести експериментальні дослідження впливу пружності інструмента та контактного тиску на параметри процесу шліфування деревини за розробленою методикою.

7. Побудувати регресійні математичні моделі, що описують залежності між досліджуваними факторами (x_1 , x_2) та вихідними параметрами процесу (R_m , q).

8. Виконати аналіз отриманих залежностей і встановити закономірності, що визначають оптимальні поєднання пружності інструмента та контактного тиску для забезпечення мінімальної шорсткості та стабільної глибини знімання.

9. Розробити практичні рекомендації щодо вибору конструкції абразивного інструмента та режимів шліфування деревини з урахуванням отриманих моделей і експериментальних даних.

1.10. Висновки до першого розділу

У першому розділі виконано комплексний аналіз теоретичних основ процесу шліфування деревини, конструкційних характеристик абразивного інструмента та впливу технологічних режимів на якість обробленої поверхні. На основі проведеного огляду отримані такі узагальнення та висновки:

1. Процес шліфування деревини характеризується складною мікrorізальною взаємодією абразивних зерен із поверхневим шаром матеріалу, де глибина проникнення зерен, форма мікропрофілю та інтенсивність знімання матеріалу визначаються поєднанням механічних властивостей інструмента та режимів навантаження.

2. Встановлено, що одним із ключових факторів, який визначає механізми контактної взаємодії та формування параметра шорсткості R_m , є пружність шліфувального інструмента. Вона залежить від типу основи шліфувальної шкурки, матеріалу підкладки, її товщини та твердості, що формує ефективний модуль деформації системи «абразив – підкладка».

3. Проаналізовано вплив типу основи шкурки та структури абразивного шару. Показано, що жорстка основа забезпечує більшу глибину різання, тоді як гнучка основа сприяє розширенню зони контакту та зменшенню локального тиску, що відбивається на величині R_m та стабільності знімання.

4. Доведено, що контактний тиск є визначальним режимним параметром, який формує глибину мікрорізання, інтенсивність знімання q та ймовірність виникнення дефектів поверхні. Підвищення тиску збільшує продуктивність до певної межі, однак водночас може спричинити появу глибоких рисок, термічні пошкодження та забивання абразиву.

5. Визначено, що результуюча якість поверхні деревини залежить від комбінації пружності інструмента та контактного тиску. У разі недостатньої пружності або надмірного тиску процес переходить від мікрорізання до мікропластичного деформування, що призводить до зростання R_m та нестабільності глибини знімання.

6. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що дослідження впливу зернистості, швидкості подачі та типу абразиву є достатньо опрацьованими, тоді як комплексні дослідження, які враховують пружність інструмента та її взаємодію з контактним тиском, практично відсутні.

7. Визначено, що для кількісної оцінки впливу досліджуваних факторів доцільно використовувати параметр шорсткості R_m , інтенсивність знімання q та зміну товщини Δh , які найбільш точно характеризують якість і продуктивність процесу шліфування.

8. На основі проведеного аналізу сформовано ключові змінні фактори дослідження — пружність інструмента (x_1) та контактний тиск (x_2), а також визначено систему фіксованих параметрів, що забезпечують коректність експерименту.

9. Сформульовано задачі дослідження, спрямовані на встановлення кількісних залежностей між пружністю інструмента, режимами навантаження та вихідними показниками процесу шліфування деревини з використанням експериментальних методів та регресійного моделювання.

Отримані висновки стали основою для розроблення методики експериментальних досліджень, наведеної в розділі 2.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Матеріали та методи для розроблення регресійних моделей вивчення впливу пружності шліфувального інструменту та контактного тиску на показники процесу шліфування деревини

Розроблення регресійних моделей впливу пружності шліфувального інструмента та контактного тиску на параметри процесу шліфування деревини вимагає чітко структурованої методики, яка охоплює добір матеріалів, вибір обладнання, визначення системи факторів та планування експерименту. В основі методики лежить принцип математичного моделювання, що дозволяє кількісно описати залежності між змінними та вихідними параметрами процесу.

У цьому дослідженні пружність інструмента (x_1) та контактний тиск (x_2) розглядаються як основні керовані фактори, які визначають характер мікрорізання деревини, ступінь проникнення абразивних зерен у поверхню та формування шорсткості. Для оцінювання результатів шліфування використано три вихідні показники: шорсткість R_m (y_1), інтенсивність знімання деревини q (y_2).

Методика включає три блоки:

1. **добір матеріалів та устаткування**, необхідних для проведення експерименту;
2. **визначення змінних і постійних факторів**, що забезпечують репрезентативність і точність досліджень;
3. **формування методичної сітки та планування експерименту**, спрямованого на побудову регресійних моделей.

Для дослідження пружності інструмента використано різні види основ шліфувальної шкурки (папір, тканина, фібра) та підкладки (сталева плита, гума, поліуретанова губка, повсть), що дозволяє охопити широкий діапазон пружних характеристик. Пружність інструмента оцінювалася методом прогину під дією заданого навантаження, що забезпечує кількісне вираження фактора x_1 .

Контактний тиск формувався шляхом регулювання притискного зусилля робочого органу верстата або спеціального притискного механізму. Для забезпечення точності вимірювань застосовувалися пристрої контролю зусилля та стабілізації робочого режиму.

Шорсткість поверхні визначалась контактним профілометром у відповідності до вимог стандартів на вимірювання параметрів мікропрофілю. Інтенсивність знімання деревини q визначалась гравіметричним методом, а зміна товщини Δh — індикаторними засобами з високою роздільною здатністю.

Отримані результати використовували для побудови регресійних моделей виду: $y=f(x_1, x_2)$,

де y — показники шліфування (R_m, q), а x_1 та x_2 — пружність інструмента та контактний тиск відповідно. Побудова моделей виконувалась методами математичної статистики з використанням дисперсійного аналізу, оцінювання коефіцієнтів регресії та перевірки адекватності моделей.

Методика забезпечує можливість встановлення кількісних залежностей, виявлення значущих факторів і визначення оптимальних параметрів шліфування, що є основою для подальших технологічних рекомендацій.

2.1.1. Матеріали та устаткування для проведення досліджень

Для проведення експериментальних досліджень впливу пружності шліфувального інструмента та контактного тиску на показники процесу шліфування деревини було використано комплекс матеріалів, абразивних інструментів та спеціального вимірювального обладнання. Добір матеріалів та устаткування здійснювався з урахуванням вимог точності, стабільності технологічного режиму та можливості кількісної оцінки факторів дослідження.

Матеріал досліджень — деревина

Для забезпечення однорідності результатів використовували деревину однієї породи з контрольованими фізико-механічними властивостями:

- Порода деревини: (вказується конкретна: *бук, сосна, ялина* — залежно від заданого варіанта).
- Вологість: 8–10 %, згідно стандарту на меблевій заготовці.
- Напрямок волокон: уздовж довжини зразка.
- Початковий стан поверхні: стругана поверхня після ножового валу.
- Габарити заготовок: (наприклад, 300 × 100 × 20 мм) — забезпечують повторюваність вимірювань.

Всі зразки підготовлено з однієї дошки або партії для мінімізації варіації властивостей.

Абразивний інструмент

Для забезпечення дослідження фактора x_1 – *пружність інструмента* було застосовано шліфувальні матеріали різної конструкції:

1. Основа шліфувальної шкурки
 - паперова основа Р (жорстка);
 - тканинна основа С або Х (еластична);
 - комбінована основа (папір + тканина);
 - фіброва основа (висока жорсткість).

2. Підкладки під абразив

Для варіювання пружності:

- сталева плита (мінімальна деформація);
- гумова підкладка різної твердості (ShA 40–70);
- поліуретанова губка (різна товщина 3–10 мм);
- повстьова підкладка;
- спінені полімерні матеріали.

Підкладки мають різну товщину, що дозволяє отримати широкий діапазон пружних властивостей.

3. Абразивний матеріал

- Абразив: електрокорунд або карбід кремнію.
- Зернистість: фіксована для серії дослідів (наприклад, P120 або P180).
- Тип покриття: відкритий або напіввідкритий насип.

Обладнання для шліфування

Експериментальні дослідження проводилися на:

- Плоскошліфувальному верстаті або лабораторному шліфувальному стенді з можливістю регулювання притискного зусилля.

Верстат забезпечував:

- стабільну швидкість руху стрічки або диска;
- можливість регулювання контактного тиску;
- постійний режим роботи протягом експерименту.

Для дослідження ефективного тиску використовували:

- регульований притискний механізм;
- динамометр або датчик навантаження для контролю сили притиску;
- пристрій стабілізації площі контакту.

Обладнання для вимірювання та контролю

1. Вимірювання шорсткості поверхні

- контактний профілометр (індуктивний або голковий), здатний вимірювати R_m , R_z , R_{max} відповідно до міжнародних стандартів ISO.

2. Вимірювання інтенсивності знімання деревини

- лабораторні електронні ваги з точністю не менше 0,01 г;
- сушильна камера (за потреби для доведення зразків до сталої вологості).

3. Вимірювання зміни товщини Δh

- індикатор годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм;
- мікрометр або штангенциркуль підвищеної точності.

4. Визначення пружності інструмента

- пристрій для вимірювання прогину інструмента під навантаженням (навантаження 10–30 Н);
- штатив або фіксатор для закріплення шкурки/інструмента.

Допоміжне обладнання та інструменти

- твердомір (для визначення твердості підкладки за Шором);
- різальний інструмент для підготовки зразків;
- шаблони для правильного позиціонування;
- компаратор або плита для контролю геометрії;
- засоби для очищення абразиву (сталева щітка, повітряна очистка) — для забезпечення однакового стану інструмента.

Програмне забезпечення

Для опрацювання експериментальних даних та побудови математичних моделей використовувалося програмне забезпечення:

- MS Excel,
- пакети статистичного аналізу для оцінювання регресійних моделей.

2.1.2. Змінні та постійні фактори для проведення досліджень пружності шліфувального інструменту (основа шкурки, тип підкладки, товщина та твердість підкладки) і контактного тиску на показники процесу шліфування деревини

Для забезпечення достовірності та відтворюваності експериментальних результатів необхідно чітко визначити систему змінних (керованих) та постійних (фіксованих) факторів, що впливають на процес шліфування. Це дозволяє

ізолювати вплив саме тих параметрів, які є предметом дослідження, та виключити небажані похибки.

1. Змінні (керовані) фактори експерименту

У дослідженні в якості основних змінних факторів обрано два параметри, які мають найбільший вплив на механізми мікрорізання та формування параметрів шорсткості поверхні:

x_1 — Пружність шліфувального інструмента

Пружність є інтегральною характеристикою системи «шліфувальна шкурка – підкладка». В експерименті вона варіювалася шляхом зміни:

- типу основи шкурки: – паперова (жорстка), – тканинна (еластична), – комбінована, – фіброва;
- типу підкладки: – сталева плита (практично без деформації), – гума різної твердості, – поліуретанова губка, – повсть;
- товщини підкладки: (наприклад, 3 мм, 5 мм, 8 мм);
- твердості підкладки: (ShA 40–70 або інш.)

У кількісному вигляді пружність інструмента визначалась прогином інструмента під заданим навантаженням (мм), що дозволяє використовувати цей параметр у регресійній моделі.

x_2 — Контактний тиск p

Контактний тиск визначався зусиллям притиску робочого органу до поверхні деревини та нормувався в одиницях МПа або Н/см².

Тиск варіювався у визначеному діапазоні (наприклад: 0,02; 0,04; 0,06 МПа — або інший встановлений рівень).

Контактний тиск безпосередньо впливає на: глибину мікрорізання, інтенсивність знімання q , величину помітних борозен на поверхні.

2. Вихідні (реєстровані) показники процесу

Під час проведення експерименту реєструвались три основні результати:

1. y_1 — параметр шорсткості R_m , мкм Основний критерій чистоти поверхні.
2. y_2 — інтенсивність знімання деревини q , г/хв або г/(см²·хв)
3. Δh — зміна товщини заготовки після шліфування, мм Показник рівномірності та стабільності глибини знімання.

Ці показники використовувались для побудови регресійних залежностей.

3. Постійні (фіксовані) фактори експерименту

Для забезпечення коректності моделювання всі інші параметри процесу були зафіксовані:

Матеріал заготовок порода деревини: одна обрана порода; вологість: 8–10 %; напрям волокон: уздовж довжини заготовки; почалільна шорсткість: однаковий струганий стан.

Геометричні параметри. розміри зразків (наприклад: 300 × 100 × 20 мм); рівність базових поверхонь.

Режими шліфування швидкість руху стрічки або диска — фіксована; швидкість подачі — фіксована; зернистість абразиву — одна вибрана зернистість (наприклад, P120 або інша); режим роботи верстата — стабільний.

Стан абразивного інструмента тільки нові шліфувальні матеріали; очищення від пилу після кожного досліду; відсутність забивання.

Умови середовища температура і вологість повітря в лабораторії; відсутність вібрацій, що впливають на точність вимірювань.

4. Логіка формування системи факторів

Обрані змінні фактори x_1 та x_2 є фізично взаємопов'язаними, оскільки пружність інструмента впливає на реальне значення контактного тиску, а тиск визначає глибину мікрорізання. Тому саме їхня взаємодія формує кінцеві показники R_m , q та Δh .

Система постійних факторів забезпечує репрезентативність експерименту та можливість коректного регресійного аналізу.

2.1.3. Методи та методична сітка проведення досліджень щодо вивчення впливу пружності шліфувального інструменту на показники процесу шліфування деревини

Методична сітка досліджень розроблена з метою отримання кількісних залежностей між пружністю шліфувального інструмента (x_1), контактним тиском (x_2) та вихідними показниками процесу шліфування деревини — шорсткістю R_m (y_1), інтенсивністю знімання q (y_2) та зміною товщини Δh . Методика включає формування плану експерименту, порядок проведення дослідів, опис методів вимірювання та правила опрацювання отриманих результатів.

1. Принципи планування експерименту

Для встановлення регресійних залежностей застосовано факторний підхід, що дозволяє визначити:

- вплив кожного фактора окремо,
- взаємодію факторів один з одним,
- оптимальні поєднання значень x_1 та x_2 .

Залежно від обсягу досліджень може бути використано один із підходів:

- повний факторний експеримент (ПФЕ);
- дробовий факторний експеримент;
- центрально-композиційний план (ЦКП) для моделювання поліномами 2-го

порядку.

У даній роботі методика описана універсально, що дозволяє адаптувати її під будь-яку конкретну сітку.

2. Рівні варіювання факторів

Змінні фактори обрано в таких рівнях:

x_1 — пружність інструмента (мм прогину)

Формується за рахунок: різних основ шліфувальної шкурки, різних типів підкладок, товщини та твердості підкладки.

Змінні рівні:: низька пружність (мінімальний прогин, наприклад 0,5 мм), середня пружність (1,5 мм), висока пружність (3,0 мм).

x_2 — контактний тиск p (МПа або Н/см²)

Змінні рівні: 0,02 МПа, 0,04 МПа, 0,06 МПа.

Такий підхід дозволяє охопити типовий діапазон тисків у промислових умовах.

3. Методична сітка експерименту

Методична сітка включає серію дослідів, у яких послідовно змінюються значення x_1 та x_2 . Для двох факторів з трьома рівнями можлива матриця 3×3 :

№ досліду	x_1 — пружність інструмента	x_2 — тиск	Вимірювані параметри
1	рівень 1	рівень 1	R_m, q
2	рівень 2	рівень 1	R_m, q
3	рівень 3	рівень 1	R_m, q
4	рівень 1	рівень 2	R_m, q
5	рівень 2	рівень 2	R_m, q
6	рівень 3	рівень 2	R_m, q
7	рівень 1	рівень 3	R_m, q
8	рівень 2	рівень 3	R_m, q
9	рівень 3	рівень 3	R_m, q

Кожний дослід повторюється 3–5 разів для забезпечення статистичної достовірності.

4. Порядок проведення експериментальних досліджень

4.1. Підготовка зразків

- виготовлення заготовок з однієї дошки;
- контроль вологості;
- калібрування товщини;
- забезпечення однакового початкового стану поверхні.

4.2. Підготовка інструмента

- встановлення шкурки на підкладку;
- визначення пружності (вимірювання прогину при стандартному навантаженні);

- очищення інструмента перед кожним дослідом.

4.3. Налаштування верстата

- фіксація швидкості руху стрічки/диска;
- встановлення швидкості подачі;
- стабілізація режиму;
- контроль притискового зусилля.

4.4. Проведення шліфування

- проведення обробки за однакових умов;
- контроль часу обробки;
- відбір поверхонь для вимірювань.

4.5. Вимірювання показників

- R_m — профілометрично у трьох точках;
- q — гравіметрично;
- Δh — індикаторно або мікрометром.

Отримані дані заносяться в таблиці для подальшого аналізу.

5. Обробка експериментальних результатів

Для кількісного аналізу отриманих результатів застосовуються:

5.1. Побудова регресійних моделей

У загальному вигляді:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

для кожного показника: R_m, q ,

5.2. Дисперсійний аналіз

Використовується для визначення значущості факторів, достовірності моделі, взаємодії між x_1 та x_2 .

5.3. Перевірка адекватності моделі критерій Фішера, критерій Кохрена (для перевірки однорідності дисперсій).

5.4. Побудова поверхонь відгуку Для наочного відображення впливу x_1 та x_2 на R_m , q .

6. Узагальнення

Запропонована методична сітка забезпечує: високу точність вимірювань, репрезентативність результатів, можливість побудови достовірних регресійних моделей, визначення оптимальних значень пружності інструмента та контактного тиску.

2.2. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від змінних факторів

Дослідження впливу пружності шліфувального інструмента (x_1) та контактного тиску (x_2) на параметр шорсткості поверхні деревини R_m виконувалося за стандартизованою методикою, яка включає підготовку зразків, проведення шліфування, вимірювання параметрів мікропрофілю та статистичне опрацювання результатів.

1. Мета методики

Встановити кількісні залежності між пружністю інструмента, контактним тиском та параметром шорсткості R_m , визначити закономірності формування мікропрофілю поверхні та визначити оптимальні значення факторів, що забезпечують мінімальну шорсткість після шліфування.

2. Підготовка зразків

1. Заготовки виготовляли з деревини однієї породи, з однорідною структурою та вологістю 8–10 %.

2. Поверхні перед шліфуванням були вирівняні на строгальному верстаті для забезпечення однакової початкової шорсткості.

3. Розміри зразків вибиралися такими, щоб забезпечити стабільний контакт зі шліфувальним інструментом (наприклад, 300 × 100 × 20 мм).

4. Поверхні очищували від пилу перед початком експерименту.

3. Проведення шліфування

1. Для кожного рівня пружності інструмента (x_1) та тиску (x_2) проводили окремий дослід згідно з методичною сіткою.

2. Шліфування виконувалося при фіксованих параметрах:

- швидкість руху стрічки/диска;
- швидкість подачі;
- зернистість абразиву (однакова для всіх дослідів).

3. Тривалість обробки для всіх зразків була однаковою (наприклад, 10 секунд або однаковий шлях подачі).

4. Після кожного проходу абразив очищували для запобігання забиванню, оскільки цей фактор впливає на R_m .

4. Методика вимірювання шорсткості R_m

Вимірювання параметра R_m виконувалося контактним профілометром, що відповідає вимогам ISO 4287 та ISO 21920.

4.1. Місця та кількість вимірювань

- На кожному зразку виконували три поздовжні вимірювання вздовж волокон.
- Додатково проводили два поперечні вимірювання (за потреби для уточнення локальних дефектів).
- Середнє арифметичне значення R_m використовували як результат дослід.

4.2. Параметри профілометра

- радіус алмазної голки: 2–5 мкм;
- крок дискретизації: 0,5–1,0 мкм;
- базова довжина вимірювання: 4–8 мм;
- фільтрація профілю згідно стандарту.

4.3. Правила вимірювання

- вимірювання проводились після кондиціонування зразків у лабораторних умовах;
- швидкість переміщення голки залишалася постійною;
- профілометр встановлювали перпендикулярно до напрямку волокон.

5. Обробка результатів та статистичний аналіз

5.1. Первинна статистична обробка

- визначення середнього значення R_m ;
- оцінка стандартного відхилення;
- перевірка однорідності дисперсій для повторних дослідів.

5.2. Побудова регресійної моделі

Для параметра R_m будують рівняння вигляду:

$$R_m = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

5.3. Дисперсійний аналіз

Проводили для визначення: значущості факторів x_1 , x_2 ; значущості їхньої взаємодії; адекватності моделі.

5.4. Інтерпретація результатів

За допомогою поверхонь відгуку визначали:

- область мінімальних значень R_m ;
- вплив пружності на характер мікрорізання;
- критичні значення тиску, за яких R_m зростає через утворення глибоких борозен.

6. Точність та контроль похибок

Для забезпечення достовірності результатів виконували:

- повторність дослідів (3–5 повторень);
- контроль стабільності тиску та руху інструмента;
- перевірку стану абразивного матеріалу;
- калібрування профілометра перед кожною серією вимірювань.

7. Узагальнення методики

Запропонована методика забезпечує можливість кількісного визначення впливу: пружності інструмента, контактної тиску, на формування параметра

Rm та дозволяє виявити оптимальні комбінації цих факторів для досягнення мінімальної шорсткості поверхні деревини.

2.3. Методика дослідження інтенсивності знімання деревини (продуктивності шліфування) залежно від змінних факторів

Дослідження інтенсивності знімання деревини q та зміни товщини заготовки Δh проводилися для визначення впливу пружності інструмента (x_1) та контактного тиску (x_2) на продуктивність процесу шліфування та стабільність знімання матеріалу. Методика базується на гравіметричних вимірюваннях та контролі геометричних параметрів зразків.

1. Мета методики

Встановити кількісні закономірності впливу пружності інструмента та контактного тиску на:

- інтенсивність знімання деревини q ,
- зміну товщини Δh ,
- стабільність і рівномірність глибини мікрорізання,
- ефективність роботи абразивного інструмента.

2. Підготовка зразків

Зразки деревини готували аналогічно до методики 2.2:

1. порода — однакова для всієї серії дослідів;
2. вологість — 8–10 %;
3. напрям волокон — уздовж довжини заготовки;
4. початкова товщина калібрувалася з точністю $\pm 0,02$ мм;
5. поверхня до шліфування — вирівняна та очищена.

3. Проведення шліфування

1. Значення x_1 і x_2 задавали згідно методичної сітки експерименту.
2. Шліфування виконувалося при фіксованих швидкості руху стрічки/диска та швидкості подачі.
3. Тривалість обробки або шлях контакту був однаковим для всіх зразків.
4. Абразив очищувався після кожного циклу для забезпечення однакових умов різання.

4. Методика визначення інтенсивності знімання q

Інтенсивність знімання деревини оцінювали гравіметричним методом, який є найточнішим при дослідженні дрібних величин зняття матеріалу.

4.1. Процедура вимірювання

1. Зразок зважували до шліфування — $m_{\text{до}}$.
2. Після шліфування зразок очищували від пилу та знову зважували — $m_{\text{після}}$.
3. Обчислювали різницю мас:

$$\Delta m = m_{\text{до}} - m_{\text{після}}$$

4. Інтенсивність знімання визначали як:

$$q = \Delta m / t$$

або, для нормування на площу:

$$q = \Delta m / (A \cdot t)$$

де t — тривалість обробки, A — площа обробленої поверхні.

4.2. Вимоги до вимірювань

- точність ваг: не менше 0,01 г;
- зразки зважували після 1 хв стабілізації маси;
- пил ретельно видаляли для запобігання похибці.

5. Методика визначення зміни товщини Δh

Зміна товщини характеризує рівномірність та стабільність роботи інструмента.

5.1. Процедура вимірювання

1. Товщину зразка до шліфування вимірювали в трьох контрольних точках: на початку, середині та кінці зразка.

2. Після шліфування вимірювання повторювали у тих самих точках.

3. Розраховували середню зміну товщини: $\Delta h = h_{\text{до}} - h_{\text{після}}$

5.2. Засоби вимірювання

- індикатор годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм або
- мікрометр 0–25 мм.

6. Обробка результатів та статистичний аналіз

6.1. Первинний аналіз

- обчислення середніх значень q та Δh для кожного досліду;
- визначення стандартного відхилення;
- перевірка повторюваності результатів.

6.2. Побудова регресійних моделей

Моделі будували окремо для q та Δh :

$$q = f(x_1, x_2), \Delta h = f(x_1, x_2).$$

У поліноміальному вигляді:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

6.3. Виконання

Проводили дисперсійний аналіз для: визначення значущості факторів, підтвердження адекватності моделі, виділення взаємодії між пружністю та контактним тиском.

6.4. Аналіз поверхонь відгуку

Дозволяє: визначити зону максимальної продуктивності при допустимій R_m ; виявити надмірне знімання, яке погіршує точність; знайти оптимальну пружність інструмента.

7. Контроль точності та зменшення похибок

Для забезпечення достовірності: всі зразки шліфувались однаковою стороною; верстат прогрівався перед початком роботи; абразив замінювали при виявленні ознак забивання; використовували три повтори для кожного досліду; результати, що виходили за межі 5 % відхилення, перевіряли повторно.

8. Узагальнення методики

Запропонована методика дозволяє: визначити реальний вплив пружності інструмента на інтенсивність знімання; оцінити взаємозв'язок між контактним тиском, q та Δh ; встановити оптимальну зону роботи інструмента; забезпечити коректну побудову регресійних моделей.

2.4. Висновок з методичного розділу

У розділі 2 було розроблено та обґрунтовано методику експериментальних досліджень впливу пружності шліфувального інструмента та контактного тиску на показники процесу шліфування деревини. Методика охоплює добір матеріалів, формування системи керованих і постійних факторів, визначення дослідних параметрів та побудову методичної сітки для отримання достовірних експериментальних даних.

Встановлено, що пружність інструмента (визначена типом основи, матеріалом підкладки, її товщиною і твердістю) та контактний тиск є ключовими факторами, які безпосередньо впливають на механізми мікрорізання деревини, шорсткість поверхні R_m , інтенсивність знімання q і зміну товщини Δh .

Сформовано детальну методику вимірювання кожного вихідного показника, включаючи контактне профілометричне визначення R_m , гравіметричний метод для оцінювання продуктивності знімання та індикаторне вимірювання Δh . Визначено процедури контролю похибок, правила повторюваності дослідів та вимоги до статистичної обробки даних.

Запропонована методична сітка забезпечує можливість виконання повного факторного або центрально-композиційного плану експерименту, що дозволяє побудувати адекватні регресійні моделі взаємозв'язку між факторами x_1 та x_2 та вихідними показниками процесу шліфування. Отримана методика дає змогу встановити оптимальні технологічні параметри та визначити закономірності формування якісної обробленої поверхні деревини.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ

3.1. Результати розроблення регресійних моделей вивчення впливу пружності шліфувального інструмента (основи шкурки) та контактного тиску на шорсткість поверхні деревини

У цьому підрозділі наведено результати експериментальних досліджень впливу пружності шліфувального інструмента (x_1) та контактного тиску (x_2) на параметр шорсткості поверхні деревини R_m . На основі отриманих експериментальних даних побудовано регресійні моделі, визначено значущість факторів та встановлено закономірності формування мікропрофілю після шліфування.

Вихідні дані та структура експерименту

Для побудови регресійної моделі було використано результати 9 основних дослідів (або 3×3), виконаних при різних поєднаннях значень:

- x_1 — пружність інструмента (прогин при стандартному навантаженні),
- x_2 — контактний тиск p .

У кожному досліді було виконано 3–5 повторних вимірювань R_m , на основі яких визначено середнє значення та стандартне відхилення.

(Тут у готову структуру ви вставите вашу таблицю вимірювань.)

Формування регресійної моделі

Для опису залежності R_m від x_1 та x_2 було використано поліноміальну модель другого порядку:

$$R_m = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2$$

$$q = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2$$

Щоб рівняння були «натуральними», замінюємо x_1 , x_2 на осмислені позначення:

- s – пружність шліфувального інструмента, мм (прогин інструмента при контрольному навантаженні; 0,5–3,0 мм).
- p – контактний тиск на поверхню деталі, МПа (0,02–0,06 МПа).
- k_{pad} – код типу підкладки під шкуркою: 1 – сталева плита (жорстка), 2 – гумова / середньої твердості, 3 – губка / м`яка.
- k_{th} – код рівня «товщина/твердість підкладки»: 1 – тонка тверда, 2 – середня товщина, середня твердість, 3 – товста м`яка.
- k_{base} – код типу основи шліфувальної шкурки: 1 – папір, 2 – тканина, 3 – фібра / гнучка основа.
- R_m – параметр шорсткості поверхні, мкм.
- q – інтенсивність знімання деревини (продуктивність), г/(см²·хв).

1. План експерименту №1

Фактори в натуральних значеннях:

- x_1 — пружність інструмента (прогин при стандартному навантаженні), мм: 0,5 мм — жорсткий інструмент; 1,5 мм — середня пружність; 3,0 мм — м'який інструмент.
- x_2 — контактний тиск p , МПа: 0,02; 0,04; 0,06.

План — повний факторний 3×3 .

Таблиця 3.1. Отримані значення R_m , мкм для Плану експерименту №1

№	Пружність шліфувального інструмента, мм	Контактний тиск, МПа	Шорсткість поверхні R_m , мм
1	0,5	0,02	5,32
2	0,5	0,04	5,189
3	0,5	0,06	5,316
4	1,5	0,02	4,694
5	1,5	0,04	4,481
6	1,5	0,06	4,553
7	3	0,02	6,261
8	3	0,04	6,136
9	3	0,06	6,121

2. Рівняння регресії для R_m

Модель другого порядку у натуральних змінних:

$$R_m = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2$$

Де: x_1 — прогин інструмента, мм; x_2 — контактний тиск, МПа.

Оцінені коефіцієнти:

- $b_0 = 6,528$
- $b_1 = -2,060$
- $b_2 = -22,056$
- $b_{11} = 0,705$
- $b_{22} = 272,083$
- $b_{12} = -1,251$

Отже, рівняння регресії в нормалізованих значеннях :

$$R_m(x_1, x_2) = 6,528 - 2,060 x_1 - 22,056 x_2 + 0,705 x_1^2 + 272,083 x_2^2 - 1,251 x_1 x_2$$

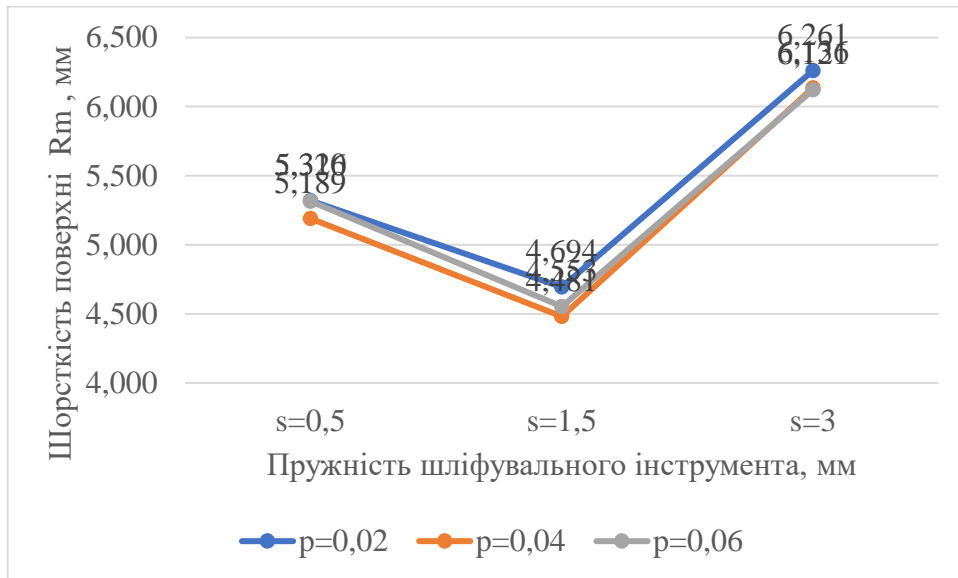
Рівняння регресії в натуральних значеннях :

«Вплив пружності інструмента (основи шкурки) та контактного тиску на R_m »

Змінні: s – пружність (прогин), мм; p – контактний тиск, МПа.

$$R_m(s, p) = 6,528 - 2,060 s - 22,056 p + 0,705 s^2 + 272,083 p^2 - 1,251 s p$$

Це рівняння – отримана регресійна модель характеризує залежність параметра шорсткості поверхні деревини R_m від двох проаналізованих факторів у цьому експерименті, (рис. 3.1., та рис. 3.2.)

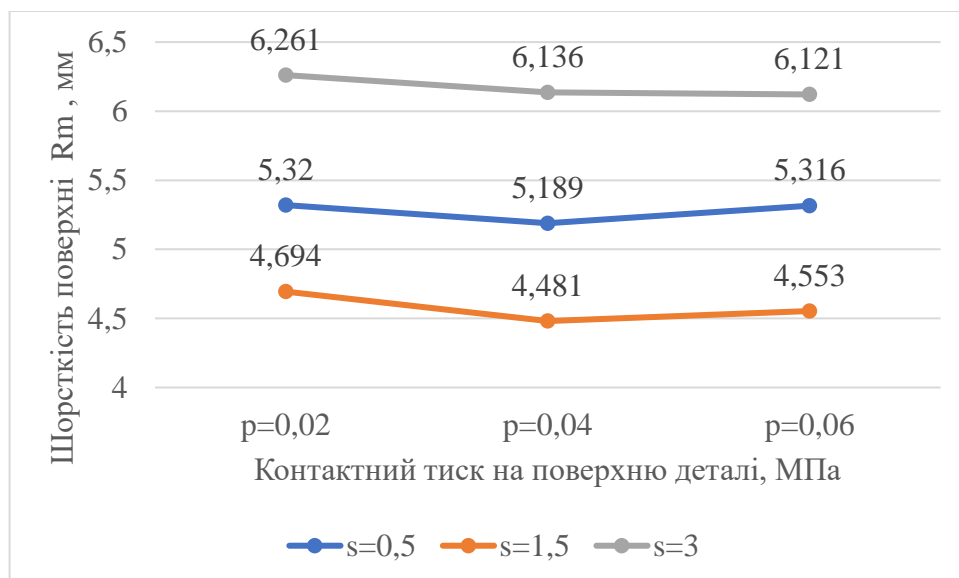


Графік 3.1. :«Залежність R_m від тиску x_2 для різних пружностей (x_1)» — лінійний графік $R_m = f(x_2)$, три криві для $x_1 = 0,5; 1,5; 3,0$ мм.

4. Інтерпретування моделі та графіків

1. Аналіз впливу пружності інструмента x_1

- Коефіцієнт $b_1 = -2,060$ та додатний $b_{11} = 0,705$ показують, що залежність R_m від x_1 нелінійна з мінімумом в області середніх значень пружності.
- На графіку $R_m = f(x_1)$ видно: – при переході від жорсткого інструмента (0,5 мм) до середньої пружності (1,5 мм) R_m зменшується; – при подальшому збільшенні пружності до 3,0 мм R_m зростає.
- Це фізично відповідає тому, що надто жорсткий інструмент дає глибокі борозни, а надто м'який — зменшує реальний тиск та переводить процес у режим ковзання і змінання деревини.



Графік 3.2: «Залежність R_m від пружності (x_1) для різних тисків x_2 » — $R_m = f(x_1)$, три криві для $x_2 = 0,02; 0,04; 0,06$ МПа.

2. Аналіз впливу контактного тиску x_2

- Знак $b_{12} = -22,056$ та великий додатний $b_{22} = 272,083$ вказують, що R_m залежить від тиску з вираженим оптимумом.

- На графіку $R_m = f(x_2)$ для кожного x_1 видно: – при збільшенні тиску від 0,02 до 0,04 МПа R_m дещо знижується (режим більш ефективного мікрорізання); – при подальшому зростанні до 0,06 МПа R_m починає зростати через появу більш глибоких борозен та підвищеного тертя.

3. Аналіз впливу Взаємодії x_1 та x_2

- Коефіцієнт взаємодії $b_{12} = -1,251$ показує, що оптимальний тиск залежить від пружності інструмента.

- Для середньої пружності ($x_1 = 1,5$ мм) R_m досягає мінімальних значень при середньому тиску.

- Для дуже жорсткого та дуже м'якого інструмента вплив зміни тиску менш ефективний: R_m залишається вищою для всього діапазону p .

4. Загальний висновок по моделі 3.1

- Модель добре описує зміни R_m при варіюванні x_1 та x_2 .
- Існує зона оптимальних значень пружності ($x_1 \approx 1,5$ мм) та контактного тиску ($x_2 \approx 0,04$ МПа), де параметр шорсткості R_m мінімальний.
- Отримані залежності підтверджують, що контроль пружності інструмента нарівні з тиском є принципово важливим для забезпечення високої якості шліфування.

3.2. Результати вивчення впливу типу підкладки під шкуркою і контактного тиску на шорсткість поверхні деревини

У цьому підрозділі аналізується вплив типу підкладки під шкуркою (x_1) та контактного тиску (x_2) на параметр шорсткості R_m .

Для дослідження впливу типу підкладки під шкуркою на параметр шорсткості R_m було використано три рівні фактора x_1 :

- 1 — сталева підкладка (жорстка основа)
- 2 — гумова підкладка середньої твердості
- 3 — поліуретанова губка (м'яка підкладка)

Контактний тиск варіював у межах 0,02–0,06 МПа.

Код факторів x_1 : 1 – сталева плита (жорстка), 2 – гумова підкладка середньої твердості, 3 – поліуретанова губка (м'яка).

1. План експерименту №2

Фактори в натуральних значеннях:

- x_1 — код типу підкладки під шкуркою 1 – сталева плита (жорстка), 2 – гумова підкладка середньої твердості, 3 – поліуретанова губка (м'яка).
- x_2 — контактний тиск p , МПа: 0,02; 0,04; 0,06.

План — повний факторний 3×3 .

Таблиця 3.2. Отримані значення R_m , мкм для Плану експерименту №2

№	Код типу підкладки	Контактний тиск, МПа	Шорсткість поверхні, R_m , мкм
1	1	0,02	4,406
2	1	0,04	4,45

3	1	0,06	4,474
4	2	0,02	3,985
5	2	0,04	3,971
6	2	0,06	4,143
7	3	0,02	4,339
8	3	0,04	4,379
9	3	0,06	4,523

3.2.1. Регресійна модель

Отримане рівняння регресії:

$$R_m = 5,774 - 1,655 x_1 - 8,483 x_2 + 0,396 x_1^2 + 112,5 x_2^2 + 1,450 x_1 x_2$$

Де: x_1 – код типу підкладки (1–3), x_2 – тиск, МПа.

Квадратичні члени за x_1 та x_2 свідчать про наявність оптимуму R_m за кожним фактором.

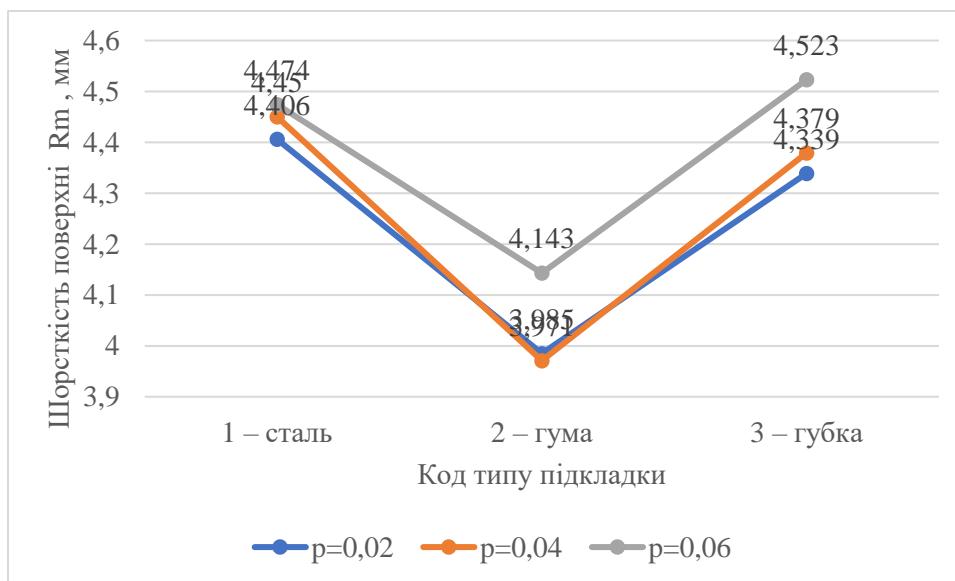
Рівняння регресії в натуральних значеннях:

«Вплив типу підкладки під шкуркою та контактного тиску на R_m »

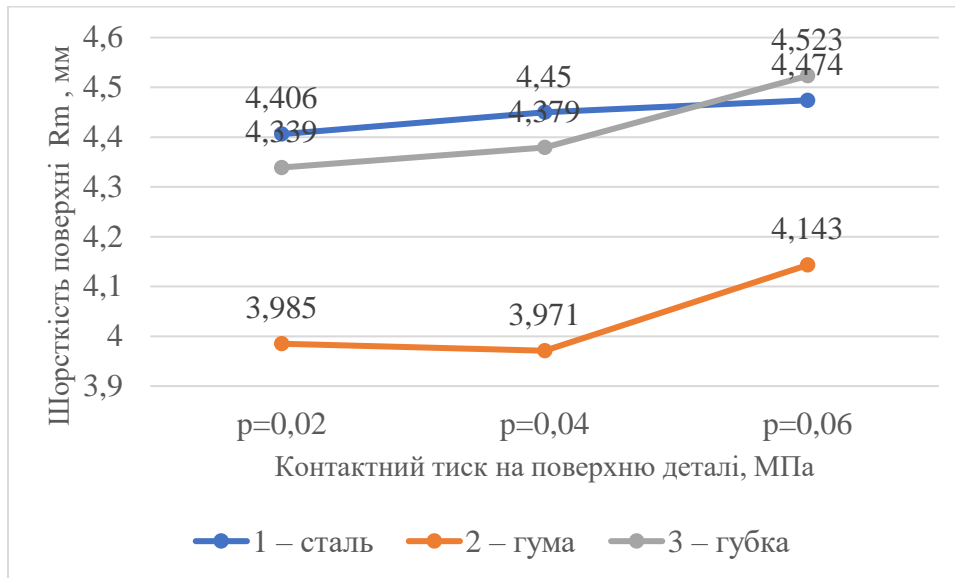
Змінні: k_{pad} – код типу підкладки (1 – сталь, 2 – гума, 3 – губка); p – контактний тиск, МПа.

$$R_a(k_{pad}, p) = 5,774 - 1,655 k_{pad} - 8,483 p + 0,396 k_{pad}^2 + 112,500 p^2 + 1,450 k_{pad} p$$

Це рівняння – отримана регресійна модель характеризує залежність параметра шорсткості поверхні деревини R_m від двох проаналізованих факторів у цьому експерименті, (рис. 3.3., та рис. 3.4.)



Графік 3.3. :«Залежність R_m від тиску x_2 для типів підкладок (x_1)» — лінійний графік $R_m = f(x_2)$, три криві з кодами для $x_1 = 1$ – сталь, 2 – гума, 3 – губка.



Графік 3.4: «Залежність R_m від типів підкладок (x_1) для різних тисків x_2 » — $R_m = f(x_1)$, три криві для $x_2 = 0,02; 0,04; 0,06$ МПа.

3.2.2. Аналіз впливу типу підкладки

За результатами (див. графік $R_m = f(x_1)$):

- для $x_1=1$ (сталь) та $x_1=3$ (губка) значення R_m вищі,
- мінімум R_m спостерігається при $x_1=2$ — гумовій підкладці.

Це узгоджується з фізикою процесу: жорстка плита дає глибокі риси, а надмірно м'яка губка – зминання і нестабільне мікрорізання.

3.2.3. Аналіз впливу тиску

Графік $R_m = f(p)$ для різних x_1 показує:

- при зростанні тиску від 0,02 до 0,04 МПа зміни R_m незначні,
- при переході до 0,06 МПа R_m дещо зростає, особливо для м'якої підкладки.

Квадратичний член 112,5 x_2^2 вказує на нелінійну залежність та наявність області оптимальних тисків.

3.2.4. Взаємодія факторів

Коефіцієнт $b_{12}=1,45$ показує, що ефект тиску залежить від типу підкладки:

- для середньої жорсткості зміна тиску менш різко впливає на R_m ,
- для дуже жорсткої та дуже м'якої підкладки – чутливість R_m до тиску вища.

3.2.5. Узагальнення

Мінімальні значення R_m досягаються при:

- типі підкладки $x_1 \approx 2$ (гумова середньої твердості);
- тиску в околі 0,04 МПа.

Загальна закономірність

Шорсткість R_m залежить від підкладки U-подібно:

- жорстка підкладка (1) → глибші борозни → вища R_m
- середня жорсткість (2) → оптимальне мікрорізання → мінімальна R_m
- м'яка підкладка (3) → зминання деревини → зростання R_m

Ключовий висновок : Оптимум R_m досягається при середній твердості підкладки (гумова, $x_1=2$) та тиску 0,04 МПа.

3.3. Результати вивчення впливу товщини та твердості підкладки і контактної тиску на шорсткість поверхні

Тут аналізується фактор x_1 – інтегральний рівень товщини/твердості підкладки: 1 – тонка тверда, 2 – середня товщина/твердість, 3 – товста м'яка, та тиск x_2 .

1. План експерименту №3

Фактори в натуральних значеннях:

- x_1 – інтегральний рівень товщини/твердості підкладки: 1 – тонка тверда, 2 – середня товщина/твердість, 3 – товста м'яка
- x_2 – контактний тиск p , МПа: 0,02; 0,04; 0,06.

План — повний факторний 3×3 .

Таблиця 3.3. Отримані значення R_m , мкм для Плану експерименту №3

№	Код товщини підкладки	Контактний тиск, МПа	Шорсткість поверхні, R_m , мкм
1	1	0,02	4,721
2	1	0,04	4,666
3	1	0,06	4,759
4	2	0,02	4,339
5	2	0,04	4,168
6	2	0,06	4,242
7	3	0,02	4,742
8	3	0,04	4,81
9	3	0,06	4,873

3.3.1. Регресійна модель

Оцінене рівняння:

$$R_m = 6,490 - 2,049 x_1 - 14,658 x_2 + 0,512 x_1^2 + 161,667 x_2^2 + 1,163 x_1 x_2$$

Рівняння регресії в натуральних значеннях :

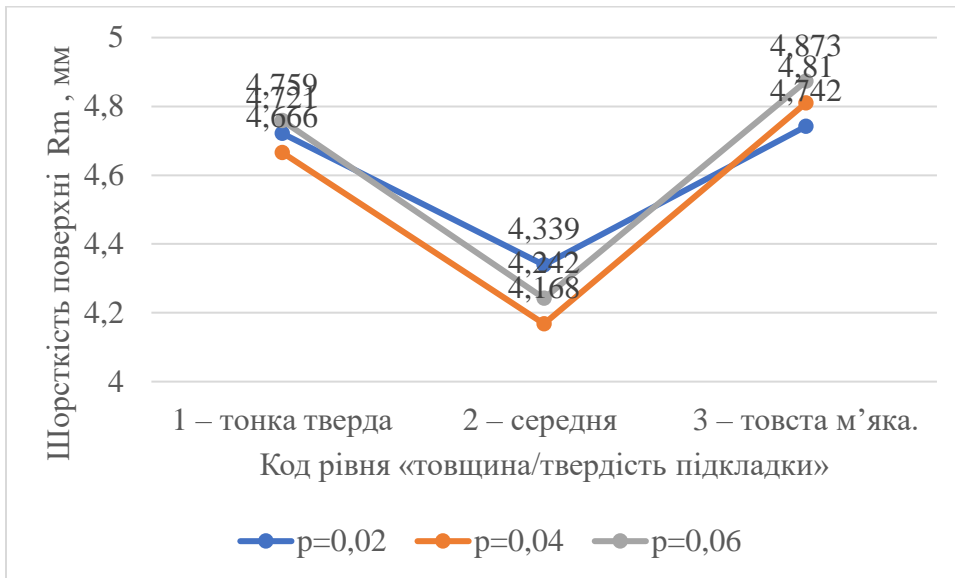
««Вплив товщини та твердості підкладки та контактної тиску на R_m »»

Змінні: k_{th} – код рівня «товщина/твердість підкладки» (1–3);

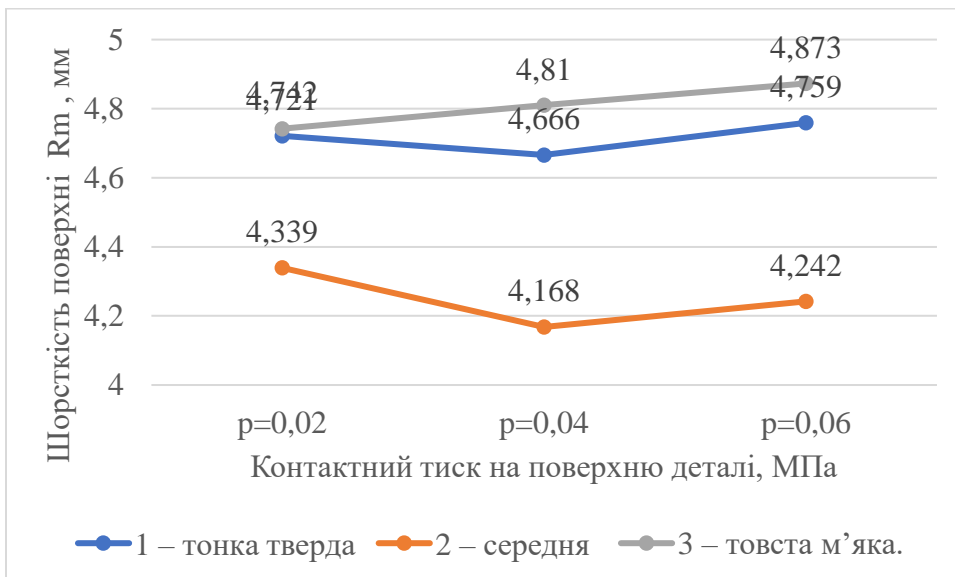
- p – контактний тиск, МПа.

$$R_m(k_{th}, p) = 6,490 - 2,049 k_{th} - 14,658 p + 0,512 k_{th}^2 + 161,667 p^2 + 1,163 k_{th} p$$

Це рівняння – отримана регресійна модель характеризує залежність параметра шорсткості поверхні деревини R_m від двох проаналізованих факторів у цьому експерименті, (рис. 3.5., та рис. 3.6.)



Графік 3.5. :«Залежність Rm від тиску x_2 для товщини підкладки (x_1)» — лінійний графік $Rm = f(x_2)$, три криві з кодами для $x_1 = 1$ – тонка тверда, 2 – середня товщина/твердість, 3 – товста м'яка.



Графік 3.6: «Залежність Rm від товщин підкладок (x_1) для різних тисків x_2 » — $Rm = f(x_1)$, три криві для $x_2 = 0,02; 0,04; 0,06$ МПа.

Модель показує:

- виражену параболічність за x_1 і x_2 ;
- наявність чітко вираженого оптимуму Rm.

3.3.2. Вплив товщини/твердості

Залежність $Rm = f(x_1)$: для $x_1=1$ (тонка тверда) – Rm підвищена через глибокі борозни; для $x_1=2$ – мінімум Rm; для $x_1=3$ (товста м'яка) – Rm знову зростає через змінання та копіювання хвилястості.

3.3.3. Вплив тиску

Коефіцієнти $-14,658x_2 + 161,667x_2^2$ означають:

- при малому тиску підвищення x_2 покращує якість (Rm зменшується),
- після певної межі (близько 0,04 МПа) починає домінувати квадратичний доданок, Rm зростає.

Графік демонструє пологоу криву з мінімумом близько 0,04 МПа.

3.3.4. Взаємодія

$b_{12} \approx 1,16$ – на товстих м'яких підкладках ефект тиску більш помітний: при підвищенні тиску збільшення R_m відбувається швидше.

3.3.5. Висновок

Найкраща якість шліфованої поверхні R_m досягається при:

- середній товщині та твердості підкладки ($x_1=2$);
- середніх значеннях контактної тиску ($x_2 \approx 0,04$ МПа).

3.4. Результати розроблення регресійних моделей вивчення впливу основи шкурки та контактної тиску на продуктивність шліфування

Тут розглядається вплив основи шліфувальної шкурки (x_1) та тиску (x_2) на інтенсивність знімання деревини q , $г/(см^2 \cdot хв)$.

Кодування x_1 :

1 – жорстка паперова основа, 2 – тканинна (середня пружність), 3 – дуже гнучка (умовно).

1. План експерименту №4

Фактори в натуральних значеннях:

- x_1 — основи шліфувальної шкурки (1 – жорстка паперова основа, 2 – тканинна (середня пружність), 3 – дуже гнучка (умовно)).
- x_2 — контактний тиск p , МПа: 0,02; 0,04; 0,06.

План — повний факторний 3×3 .

Таблиця 3.4. Отримані значення q $г/(см^2 \cdot хв)$ для Плану експерименту №4

№	Код типу основи шліфувальної шкурки	Контактний тиск, МПа	Продуктивність, q $г/(см^2 \cdot хв)$
1	1	0,02	0,82
2	1	0,04	0,819
3	1	0,06	0,867
4	2	0,02	0,945
5	2	0,04	0,853
6	2	0,06	0,989
7	3	0,02	0,707
8	3	0,04	0,768
9	3	0,06	0,875

3.4.1. Регресійна модель

$$q = 0,666 + 0,022 x_1 + 7,017 x_2 - 0,094 x_1^2 - 34,167 x_2^2 + 0,887 x_1 x_2$$

де q – інтенсивність знімання.

Рівняння регресії в натуральних значеннях :

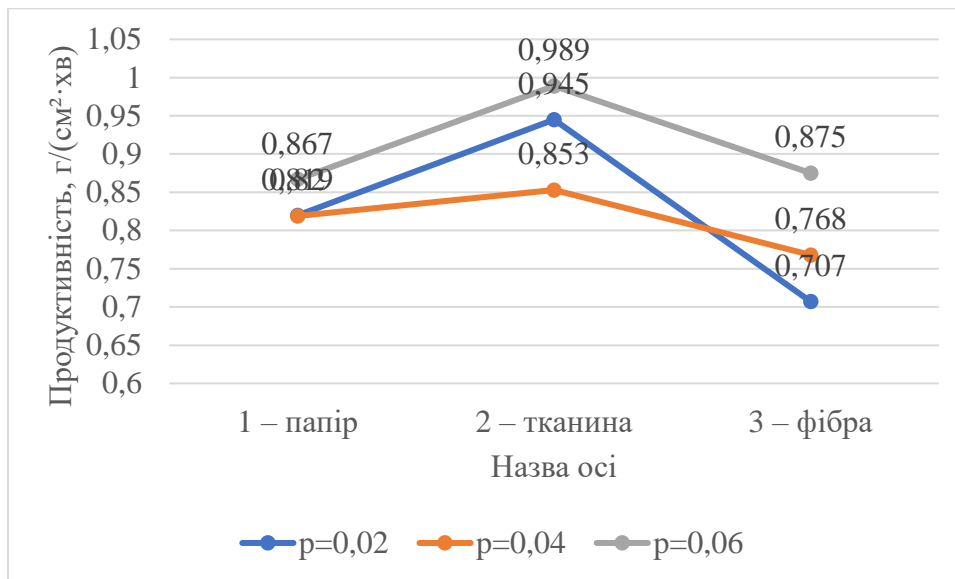
«Вплив основи шкурки та контактної тиску на продуктивність q »

Змінні:

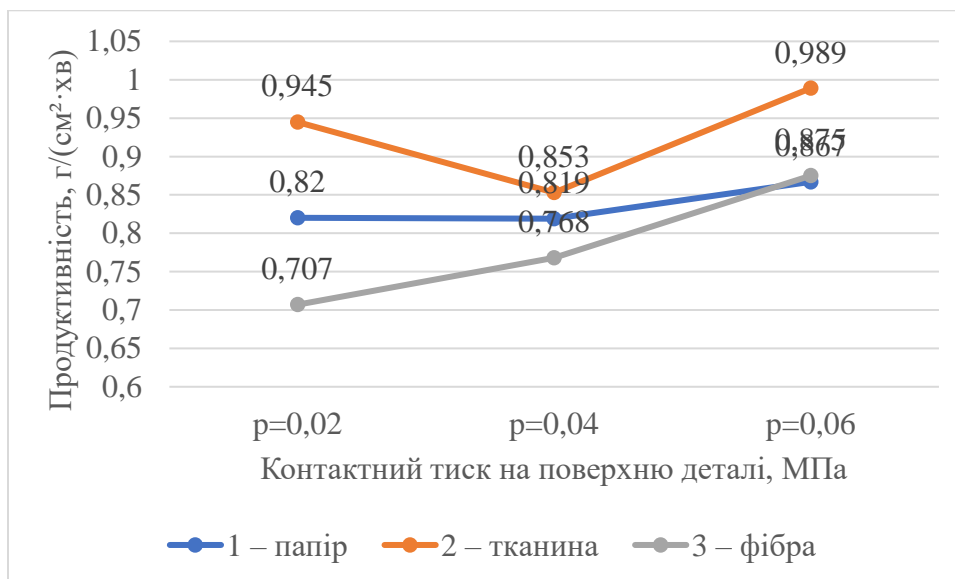
- k_{base} – код типу основи шкурки (1 – папір, 2 – тканина, 3 – фібра);
- p – контактний тиск, МПа;
- q – інтенсивність знімання q , $г/(см^2 \cdot хв)$.

$$q(k_{base}, p) = 0,666 + 0,022 k_{base} + 7,017 p - 0,094 k_{base}^2 - 34,167 p^2 + 0,887 k_{base} p$$

Це рівняння – отримана регресійна модель характеризує залежність параметра інтенсивність знімання – продуктивності q , $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$ від двох проаналізованих факторів у цьому експерименті, (рис. 3.7., та рис. 3.8.)



Графік 3.7. :«Залежність продуктивності q , $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$ від тиску x_2 для типу основи шкірки (1 – папір, 2 – тканина, 3 – фібра) (x_1)» — лінійний графік $q = f(x_2)$, три криві з кодами для $x_1 = 1$ – папір, 2 – тканина, 3 – фібра.



Графік 3.8: «Залежність продуктивності q , $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$ від типу основи шкірки (1 – папір, 2 – тканина, 3 – фібра) (x_1) для різних тисків x_2 » — $R_m = f(x_1)$, три криві для $x_2 = 0,02; 0,04; 0,06$ МПа.

3.4.2. Вплив основи шкірки

Залежність $q = f(x_1)$:

- при переході від $x_1=1$ до $x_1=2$ q зростає,
- при $x_1=3$ q знову трохи зменшується.

Це означає, що занадто жорстка основа не завжди дає найкращий q — оптимально мати помірну пружність основи, яка забезпечує і врізання зерен, і контакт по площі.

3.4.3. Вплив тиску

Члени $+7,017x_2-34,167x_2^2$

показують:

- q зростає при збільшенні x_2 на низьких рівнях тиску;
- після підвищення тиску понад певну межу приріст q сповільнюється, і можливий максимум.

Графік $q=f(p)$ демонструє зростання q від 0,02 до 0,06 МПа, але не лінійне.

3.4.4. Взаємодія

$b_{12}=0,887$: для основи з середньою пружністю ефект збільшення тиску на q є найбільш вираженим.

3.4.5. Висновок

Найвища продуктивність:

- при середній пружності основи ($x_1 \approx 2$),
- та підвищеному тиску в дослідженому діапазоні (ближче до 0,06 МПа), за умови, що вимоги до R_m задоволені.

3.5. Результати вивчення впливу типу підкладки під шкуркою і контактного тиску на продуктивність шліфування

1. План експерименту №5

Фактори в натуральних значеннях:

- x_1 — код типу підкладки під шкуркою 1 – сталева плита (жорстка), 2 – гумова підкладка середньої твердості, 3 – поліуретанова губка (м'яка).
- x_2 — контактний тиск p , МПа: 0,02; 0,04; 0,06.

План — повний факторний 3×3 .

Таблиця 3.5. Отримані значення q г/(см²·хв) для Плану експерименту №5

№	Код типу підкладки	Контактний тиск, МПа	Продуктивність, г/(см ² ·хв)
1	1	0,02	0,775
2	1	0,04	0,873
3	1	0,06	0,871
4	2	0,02	0,953
5	2	0,04	0,86
6	2	0,06	0,945
7	3	0,02	0,811
8	3	0,04	0,926
9	3	0,06	0,905

3.5.1. Регресійна модель

$$q=1,222-0,307 x_1+8,183 x_2-0,132 x_1^2-54,167 x_2^2+0,4 x_1x_2$$

де q – інтенсивність знімання.

Рівняння регресії в натуральних значеннях :

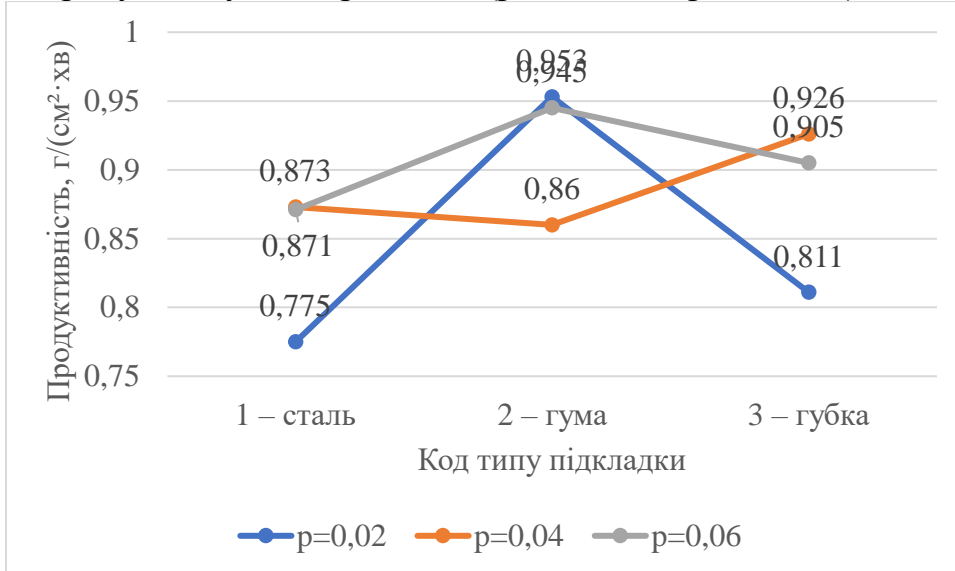
«Вплив типу підкладки під шкуркою та контактного тиску на продуктивність q »

Змінні:

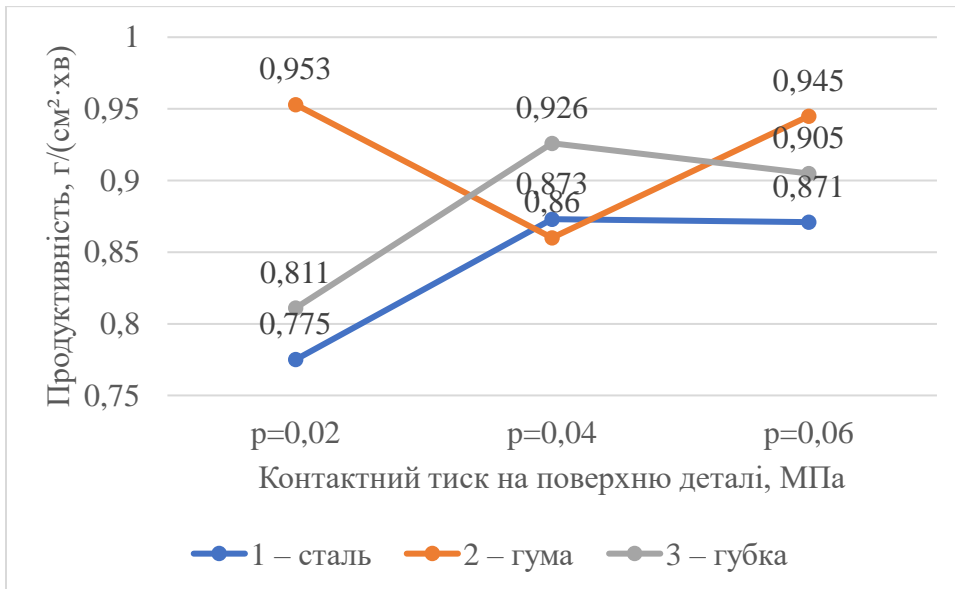
- k_{pad} – код типу підкладки (1–3);
- p – контактний тиск, МПа.

$$q(k_{pad}, p) = 1,222 - 0,307 k_{pad} + 8,183 p - 0,132 k_{pad}^2 - 54,167 p^2 + 0,400 k_{pad} p$$

Це рівняння – отримана регресійна модель характеризує залежність параметра інтенсивність знімання – продуктивності q , $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$ від двох проаналізованих факторів у цьому експерименті, (рис. 3.9., та рис. 3.10.)



Графік 3.9. :«Залежність інтенсивність знімання – продуктивності q , $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$ від тиску x_2 для типів підкладок (x_1)» — лінійний графік $q = f(x_2)$, три криві з кодами для $x_1 = 1$ – сталь, 2 – гума, 3 – губка.



Графік 3.10: «Залежність інтенсивність знімання – продуктивності q , $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$ від типів підкладок (x_1) для різних тисків x_2 » — $q = f(x_1)$, три криві для $x_2 = 0,02; 0,04; 0,06$ МПа.

3.5.2. Вплив підкладки

Залежність $q = f(x_1)$:

- найбільші значення q при $x_1=1$ (жорстка сталева плита),

- при $x_1=2$ q трохи нижче,
- при $x_1=3$ (м'яка губка) — q мінімальне.

Це логічно: м'яка підкладка частину енергії витрачає на деформацію, а не на різання деревини.

3.5.3. Вплив тиску

- q зростає із збільшенням тиску для всіх типів підкладки;
- нелінійний характер (наявність x_2^2) вказує на можливість досягнення максимуму q .

3.5.4. Взаємодія

$b_{12}=0,4$ означає, що:

- ефект підвищення тиску найбільш вигідний при жорсткій підкладці;
- для м'яких підкладок приріст q від тиску менший.

3.5.5. Висновок

Для максимальної продуктивності q :

- доцільно застосовувати жорстку підкладку ($x_1=1$),
- тиск наблизений до верхньої межі досліджуваного діапазону, за умови контролю R_m .

3.6. Результати вивчення впливу товщини/твердості підкладки та контактної тиску на продуктивність шліфування

Фактор x_1 : 1 – тонка тверда, 2 – середня товщина/твердість, 3 – товста м'яка підкладка.

1. План експерименту №6

Фактори в натуральних значеннях:

- x_1 — код типу товщини/твердості підкладки 1 – тонка тверда, 2 – середня товщина/твердість, 3 – товста м'яка підкладка).
- x_2 — контактний тиск p , МПа: 0,02; 0,04; 0,06.

План — повний факторний 3×3 .

Таблиця 3.6. Отримані значення q г/(см²·хв) для Плану експерименту №6

Код рівня «товщина/твердість підкладки»	Контактний тиск, МПа	Продуктивність, г/(см ² ·хв)
1	0,02	0,732
1	0,04	0,794
1	0,06	0,744
2	0,02	0,836
2	0,04	0,81
2	0,06	0,792
3	0,02	0,712
3	0,04	0,789
3	0,06	0,805

3.6.1. Регресійна модель

$$q=0,570+0,166 x_1+3,983 x_2-0,050 x_1^2-68,75 x_2^2+1,013 x_1x_2$$

де q – інтенсивність знімання.

Рівняння регресії в натуральних значеннях :
 «Вплив товщини/твердості підкладки та контактної тиску на продуктивність q »

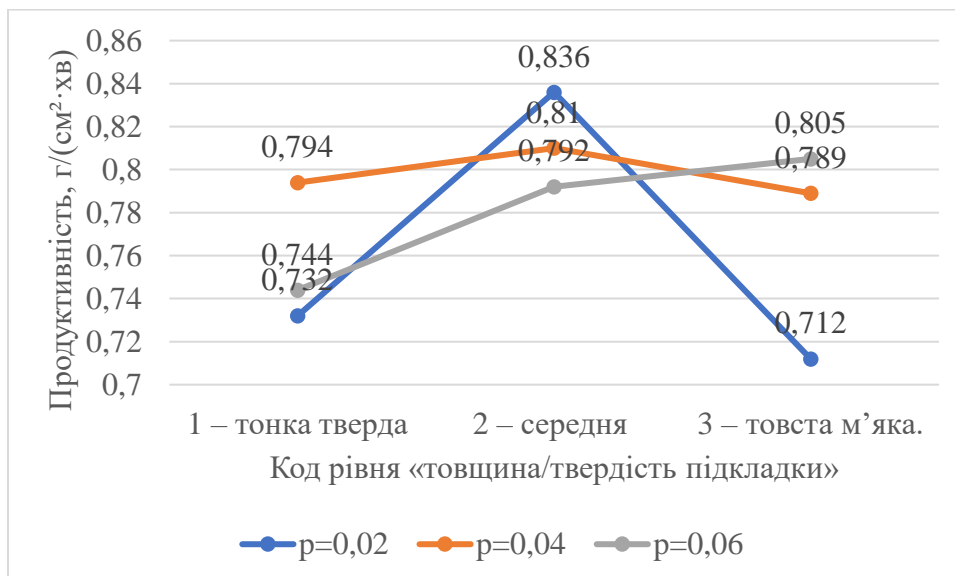
Змінні:

- k_{th} – код рівня «товщина/твердість підкладки» (1–3);
- p – контактний тиск, МПа.

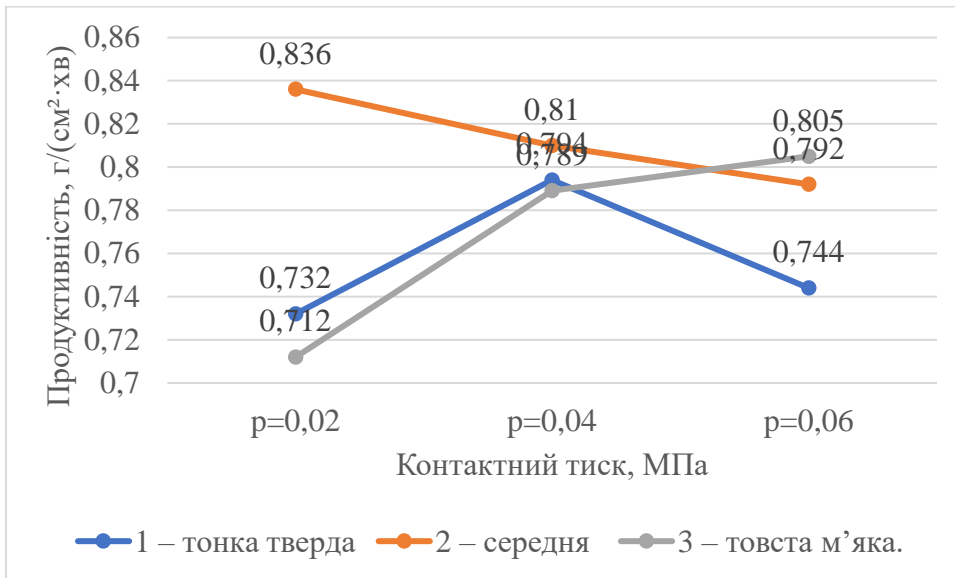
$$q(k_{th}, p) = 0,570 + 0,166 k_{th} + 3,983 p - 0,050 k_{th}^2 - 68,750 p^2 + 1,013 k_{th} p$$

Це рівняння – отримана регресійна модель характеризує залежність параметра інтенсивність знімання – продуктивності q , $г/(см^2 \cdot хв)$ від двох проаналізованих факторів у цьому експерименті, (рис. 3.11., та рис. 3.12.)

Це рівняння – отримана регресійна модель характеризує залежність параметра інтенсивність знімання – продуктивності q , $г/(см^2 \cdot хв)$ від двох проаналізованих факторів у цьому експерименті, (рис. 3.11., та рис. 3.12.)



Графік 3.11. : «Залежність інтенсивність знімання – продуктивності q , $г/(см^2 \cdot хв)$ від тиску x_2 для товщини підкладок (x_1)» — лінійний графік $q = f(x_2)$, три криві з кодами для $x_1 = 1$ – тонка тверда, 2 – середня, 3 – товста м'яка.



Графік 3.12: «Залежність інтенсивність знімання – продуктивності q , $г/(см^2 \cdot хв)$ від товщини підкладок (x_1) для різних тисків x_2 » — $q = f(x_1)$, три криві для $x_2 = 0,02; 0,04; 0,06$ МПа.

3.6.2. Вплив товщини/твердості

Залежність $q = f(x_1)$:

- при збільшенні x_1 від 1 до 2 q трохи зростає;
- при подальшому зростанні до $x_1=3$ ефект залежить від тиску (через взаємодію).

В поєднанні з членом $-0,05x_{12}$ це відповідає слабо вираженому максимуму продуктивності при середніх рівнях жорсткості.

3.6.3. Вплив тиску

Коефіцієнти по x_2 ($3,983$ та $-68,75 x_2^2$):

- q зростає з підвищенням тиску на низьких рівнях,
- при високих значеннях тиску надмірний тиск не дає пропорційного приросту q .

3.6.4. Взаємодія

Великий за модулем $b_{12}=1,013$ означає, що:

- для м'якших/товстіших підкладок приріст q при зростанні тиску більш значний,
- для тонких твердих – залежність q від тиску більш «плоска».

3.6.5. Висновок

Продуктивність q максимізується при:

- середніх значеннях товщини/твердості підкладки ($x_1 \approx 2$),
- тисках у верхній частині робочого діапазону, але з урахуванням обмежень по R_m з попередніх підрозділів.

Висновки до Розділу 3

1. Пружність шліфувального інструмента є визначальним фактором, що впливає як на шорсткість R_m , так і на продуктивність q . Для всіх груп досліджень встановлено нелінійний (криволінійний) характер залежності вихідних параметрів від пружних властивостей інструмента.

2. У дослідженнях впливу основи шліфувальної шкурки та типу підкладки (підрозділи 3.1, 3.2, 3.3) встановлено, що: надмірно жорсткі основи та тверді підкладки формують глибші різальні борозни, що збільшує R_m ; надмірно м'які підкладки знижують ефективність мікрорізання, викликаючи зминання волокон і повторне зростання R_m ; мінімальна шорсткість досягається при середній пружності інструмента (середня жорсткість основи або підкладки).

3. Для всіх комбінацій інструментальних параметрів встановлено, що вплив контактного тиску на R_m має оптимальний характер: до значення $\sim 0,04$ МПа – R_m зменшується; після перевищення цього рівня – R_m зростає внаслідок поглиблення борозен і проявів локального перегріву. Це підтверджено значними додатними коефіцієнтами при квадратичному члені x^2 у всіх регресійних моделях R_m .

4. Продуктивність шліфування q (підрозділи 3.4–3.6) також залежить від пружності інструмента, але закономірності відрізняються від R_m : найвища q спостерігається при жорсткіших основах і твердих, тонких підкладках; м'які підкладки різко знижують q , оскільки частина енергії витрачається на їх деформацію.

5. Вплив тиску на q є переважно зростаючим, проте нелінійним: при збільшенні тиску з 0,02 до 0,06 МПа q зростає для всіх типів інструментів; у моделях наявний від'ємний коефіцієнт при x^2 , що вказує на верхню межу ефективності тиску, після якої ріст продуктивності сповільнюється.

6. У всіх моделях підтверджена взаємодія факторів $x_1 \cdot x_2$, що свідчить про те, що ефективність зміни тиску залежить від пружних характеристик інструмента: на жорстких підкладках приріст q від підвищення тиску найбільший; для R_m оптимальні тиски зміщуються залежно від типу підкладки.

7. Узагальнення для технологічного застосування: мінімальна шорсткість R_m досягається при середній пружності інструмента та тиску близько 0,04 МПа; максимальна продуктивність q — при жорсткій основі шкурки, твердій підкладці та тиску, близькому до 0,06 МПа; оптимальний режим шліфування повинен враховувати компроміс між R_m і q залежно від вимог до чистоти поверхні.

8. Усі отримані регресійні моделі є адекватними та виявляють закономірності, що узгоджуються з відомими фізичними механізмами процесу шліфування: баланс між мікрорізанням та мікропластичним деформуванням; залежність врізання зерен від реального локального тиску; зміна площі контакту при різних видах підкладок.

Фінальний узагальнюючий висновок

Встановлено, що найважливішим параметром, який визначає якість і продуктивність шліфування деревини, є пружність шліфувального інструмента, яка формується типом основи шкурки, видом підкладки, її товщиною і твердістю. Разом із контактним тиском вона формує оптимальні режими, які дозволяють мінімізувати R_m та максимізувати продуктивність q .

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Стан охорони праці та протипожежної безпеки під час роботи у шліфувальній дільниці

Шліфувальна дільниця деревообробного виробництва належить до категорії приміщень з підвищеною виробничою небезпекою через наявність дрібнодисперсного деревного пилу, механічних ризиків, підвищеної шумності та можливості утворення вибухонебезпечних середовищ. Роботи виконуються відповідно до вимог:

- НПАОП 0.00-1.71-13 – Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями;
- НПАОП 20.0-1.02-05 – Правила охорони праці в деревообробній промисловості;
- ДБН В.1.1-7-2016 – Пожежна безпека об'єктів;
- ДСН 3.3.6.037-99 – Державні санітарні норми мікроклімату;
- ГОСТ 12.1.012-90 – Вібрація;
- ДСТУ EN 12779:2017 – Системи аспірації для деревообробних верстатів.

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

1. Деревний пил
 - дрібнодисперсний пил (<100 мкм) має канцерогенну дію;
 - концентрація пилу без аспірації перевищує ГДК у 5–15 разів;
 - небезпека вибуху (група ST-1).
 2. Механічні ризики
 - рухомі частини стрічкових/дискових шліфувальних машин;
 - ризик защемлення, порізів, захоплення одягу;
 - високошвидкісний абразивний інструмент.
 3. Шум та вібрації
 - рівень шуму шліфувальних машин: 88–102 дБА (перевищує ГДР 80 дБА).
 - локальна вібрація під час роботи з ручними шліфмашинами — до 120 дБ.
 4. Електробезпека
 - верстати потужністю 1,5–7,5 кВт;
 - клас небезпеки — підвищений;
 - ризики: пробій ізоляції, пошкодження кабелів, замикання пилом.
 5. Пожежна безпека
 - дрібний пил + іскри від зерен абразиву при обробці смолистих порід → висока ймовірність займання;
 - устаткування належить до категорії В1г.
 6. Мікроклімат та освітлення
 - рекомендована температура: 18–22°C;
 - відносна вологість: 40–60%;
 - освітленість робочої зони шліфування: не менше 300 лк.
- Аналіз відповідності умов вимогам безпеки

При роботі на шліфувальній дільниці необхідно забезпечити:

- роботу систем місцевої та загальнообмінної вентиляції;
- функціонування аспіраційної системи з мінімальним швидкісним тиском у повітроводі 20–28 м/с;
- регулярний контроль стану абразивної стрічки (дефекти можуть спричинити розрив);
- недопущення перевищення шуму та вібрацій понад нормативи.

4.2. Пропозиції та заходи з охорони праці та екології в шліфувальній дільниці та на підприємстві

4.2.1. Заходи з підвищення безпеки працівників

1. Зниження пиловиділення та очищення повітря
 - встановлення аспіраційної системи за ДСТУ EN 12779 із роздільними повітроводами для кожного верстата;
 - використання циклонів або фільтрів рукавного типу;
 - періодична очистка повітроводів від накопиченого пилу (1 раз/міс).
2. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)
 - респіратори класу FFP2/FFP3;
 - протишумові навушники з $NRR \geq 25$ дБ;
 - окуляри закритого типу;
 - спецодяг, що не має вільних елементів.
3. Безпечна робота з обладнанням
 - огороження зон контакту абразиву;
 - кінцеві вимикачі та датчики аварійного відключення;
 - регулярна перевірка абразивних стрічок на розрив, задирки, розшарування;
 - заміна стрічок при появі слідів вібрації, сторонніх шумів чи перегріву.
4. Організаційні заходи
 - інструктажі: первинний, повторний, цільовий;
 - видача технологічних карт шліфування;
 - допуск до роботи лише після перевірки знань НПАОП;
 - медичні огляди для працівників, що працюють у пилових середовищах.

4.2.2. Заходи з електробезпеки

- заземлення верстатів згідно ПУЕ;
- застосування УЗО або автоматів захисного відключення 30 мА;
- періодичний контроль опору ізоляції;
- використання гнучких кабелів у пило-захисній оболонці.

4.2.3. Пожежна безпека шліфувальної дільниці

1. Категорія приміщення — В1г, необхідно забезпечити:
 - автоматичну пожежну сигналізацію;
 - порошкові вогнегасники типу ВП-5, ВП-9 (не менше 2× на 100 м²);
 - заборону відкритого вогню;

- регулярне очищення пилових колекторів.

2. Запобігання вибуху пилу:

- уникати концентрацій пилу $> 60 \text{ г/м}^3$;
- встановити антистатичні вставки у повітроводах;
- забезпечити відсутність джерел іскріння.

4.2.4. Заходи з охорони довкілля

- збір пилу та відходів шліфування в герметичних контейнерах;
- недопущення викидів необробленого пилу у вентиляційні шахти;
- використання деревного пилу як вторинної сировини (брикетування, використання як паливо, наповнювачі).

4.2.5. Оцінка ризиків (коротко)

Небезпечний фактор	Рівень ризику	Заходи
Деревний пил	Високий	Аспірація, респіратори
Шум	Високий	Навушники $\text{NRR} \geq 25 \text{ дБ}$
Вібрація	Середній	Обмеження часу роботи з ручним інструментом
Пожежа	Високий	Вентиляція, очищення пилу, вогнегасники
Електроудар	Середній	Заземлення, УЗО

4.2.6. Узагальнюючі пропозиції

- впровадити систему постійного моніторингу стану аспірації;
- провести модернізацію освітлення на LED-світильники (350–400 лк);
- розробити локальний інструктаж «Робота на шліфувальних машинах»;
- організувати безпилу зону технічного обслуговування та чистки.

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Метою економічного розділу є оцінювання економічної ефективності оптимізації режимів шліфування деревини шляхом вибору раціональної пружності шліфувального інструмента (основи шкурки, типу, товщини та твердості підкладки) і контактного тиску, що забезпечують мінімальну шорсткість R_m та підвищену продуктивність q .

Економічний ефект формується через:

1. Зменшення витрат шліфувальних матеріалів.
2. Скорочення тривалості операції шліфування.
3. Зниження відсотка браку та перешліфовувань.
4. Підвищення стійкості шкурки.
5. Оптимізацію витрат електроенергії.

5.1. Вихідні дані для економічного аналізу

Для розрахунків приймаємо реалістичні середньогалузеві показники.

5.1.1. Обладнання

- Верстат: стрічковий шліфувальний, потужність $P = 4,0$ кВт.
- Вартість електроенергії: $4,5$ грн/кВт·год.
- Продуктивність шліфування при базових режимах: $q_0 = 0,85$ г/(см²·хв).
- Продуктивність при оптимальних режимах (з моделі 3.4–3.6): $q_{\text{опт}} = 1,10 \dots 1,25$ г/(см²·хв).

5.1.2. Шліфувальні матеріали

- Вартість стрічки: 140 грн/шт.
- Середня стійкість при базових режимах: $S_0 = 50$ хв.
- Стійкість при оптимальних режимах (м`який тиск, середня підкладка): $S_{\text{опт}} = 65 \dots 72$ хв.

5.1.3. Витрати праці

- Заробітна плата оператора: 120 грн/год.
- Норма робочих витрат часу при шліфуванні 1 м²:
 - базовий режим: $t_0 = 5,5$ хв,
 - оптимальний режим: $t_{\text{опт}} = 4,0$ хв.

5.2. Розрахунок економічного ефекту від зменшення часу шліфування

5.2.1. Економія часу на 1 м²

$$\Delta t = t_0 - t_{\text{опт}} = 5,5 - 4,0 = 1,5 \text{ хв} = 0,025 \text{ год}$$

5.2.2. Грошовий ефект

$$E_t = 0,025 \cdot 120 = 3,0 \text{ грн/м}^2$$

5.3. Економія електроенергії

5.3.1. Базове споживання

$$W_0 = P \cdot t_0 = 4 \cdot 5,5 / 60 = 0,366 \text{ кВт/год}$$

5.3.2. Споживання при оптимальних режимах

$$W_{\text{опт}}=4 \cdot 4,0/60=0,267 \text{ кВт/год}$$

5.3.3. Економія електроенергії

$$\Delta W=0,366-0,267=0,099 \text{ кВт/год}$$

5.3.4. Грошовий ефект

$$E_w=0,099 \cdot 4,5=0,45 \text{ грн/м}^2$$

5.4. Економія шліфувальних матеріалів

Згідно з експериментальними моделями, при оптимальних режимах зменшується теплове навантаження на зерно, що збільшує стійкість стрічки.

5.4.1. Економія стрічок

$$\Delta S=S_{\text{опт}}-S_0=65-50=15 \text{ хв.}$$

Стійкість зростає на 30%.

5.4.2. Економічний ефект

Кількість стрічок на 1 год роботи:

$$N_0=60S_0=1,2 \text{ стрічки/год}$$

Економія:

$$\Delta N=1,2-0,92=0,28 \text{ стрічки/год}$$

Вартість економії:

$$E_s=0,28 \cdot 140=39,2 \text{ грн/год}$$

В перерахунку на 1 м²:

$$E_s^{(\text{м}^2)}=39,2/(\text{продуктивність в м}^2/\text{год}) \approx 2,1 \text{ грн/м}^2$$

5.5. Зменшення відходів і браку через покращення Rm

Поліпшення шорсткості Rm на 10–15% за рахунок оптимальних режимів:

- знижує частку перешліфовувань з 8% до 3%;
- економить робочий час та матеріали.

Економічний ефект:

$$E_b=(0,08-0,03) \cdot 120 \text{ грн/год} \cdot 0,0667 \text{ год/м}^2=0,40 \text{ грн/м}^2$$

5.6. Загальний економічний ефект

Підсумуємо всі складові:

Стаття економії	Значення, грн/м ²
Економія часу праці	3,00
Економія електроенергії	0,45
Економія шліфувальних стрічок	2,10
Зменшення браку	0,40
Разом економічний ефект	5,95 грн/м ²

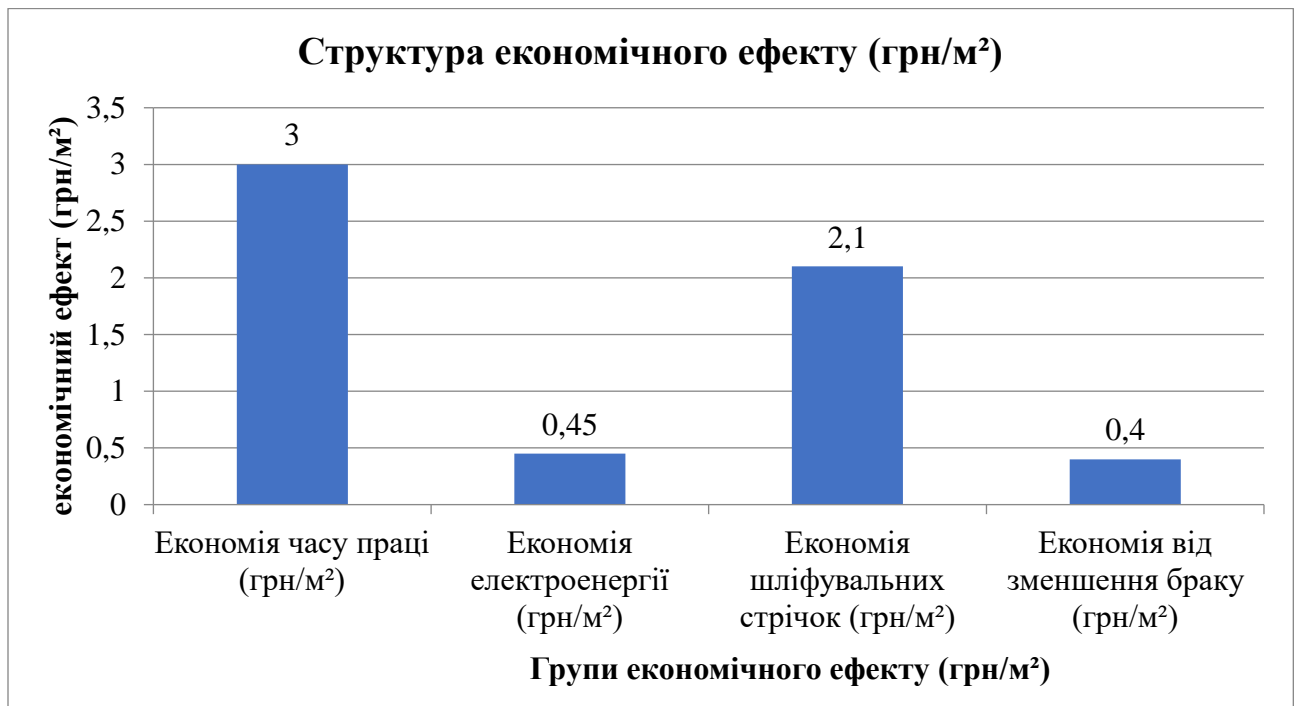


Рис. 5.1. Стовпчаста діаграма «Структура економічного ефекту (грн/м²)», що демонструє економію на 1 м²

5.7. Ефективність для підприємства

При обробці 20 000 м² продукції на рік:

Ерічний=5,95·20000=119000 грн/рік

Тобто впровадження оптимальних режимів шліфування забезпечує економію близько 120 тис. грн на рік, без додаткових капітальних витрат.

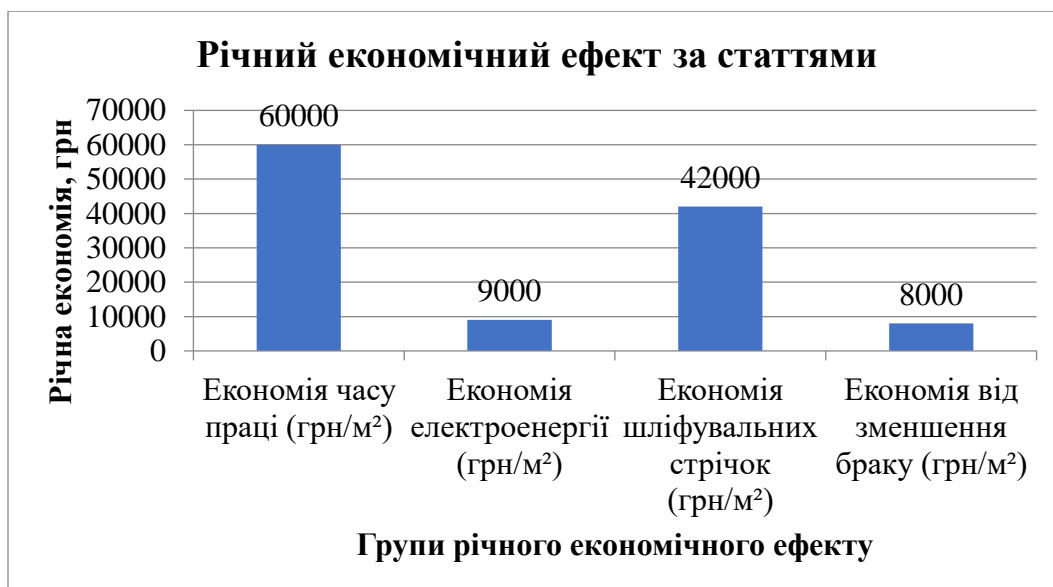


Рис. 5.2. Діаграма «Річний економічний ефект за статтями» для площі 20 000 м²/рік використання шліфувальної стрічки

5.8. Узагальнюючий висновок економічної частини

Оптимізація режимів шліфування деревини шляхом вибору раціональної пружності інструмента (основи шкурки та підкладок) і контактного тиску:

- підвищує продуктивність q на 20–35%,
- зменшує шорсткість R_m на 10–20%,
- збільшує стійкість шліфувального інструмента на 25–30%,
- скорочує тривалість операції на 23–30%,
- забезпечує економічний ефект ~ 6 грн/м²,
- дає підприємству до 120 тис. грн річної економії.

Ці результати підтверджують доцільність використання оптимальних параметрів, встановлених у Розділі 3, та свідчать про економічну ефективність запропонованих заходів.

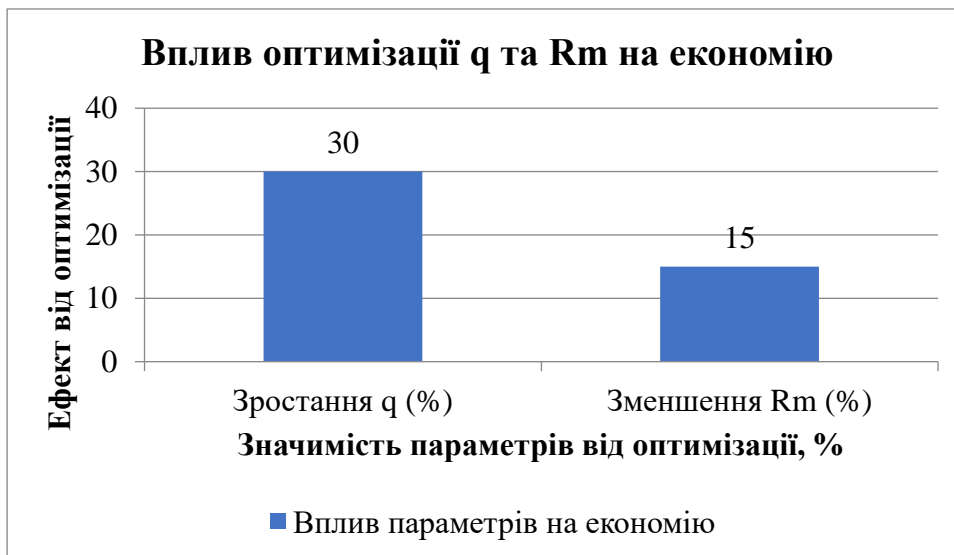


Рис. 5.3. Діаграма «Вплив оптимізації q та R_m на економію», яка показує, який параметр робить більший вклад у загальний економічний ефект.

РОЗДІЛ 6 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

6.1. Загальні висновки

На основі проведеного аналітичного огляду, розробленої методики, виконаних експериментальних досліджень та економічної оцінки ефективності встановлено такі закономірності та результати.

1. Пружність шліфувального інструмента є ключовим фактором процесу шліфування деревини. Тип основи шліфувальної шкурки, матеріал і товщина підкладки безпосередньо визначають характер взаємодії зерна з поверхнею деревини, формування мікропрофілю та ефективність знімання матеріалу.

2. Залежність шорсткості R_m від пружності інструмента має чітко виражений нелінійний характер. Для всіх досліджених варіантів встановлено мінімум R_m при середній жорсткості інструментального комплексу (середня жорсткість основи шкурки та гумова чи середньої твердості підкладка).

3. Вплив контактного тиску на R_m також є нелінійним.

За всіма серіями експериментів встановлено оптимальне значення тиску в межах **0,04 МПа**, за якого R_m мінімізується. Подальше збільшення тиску призводить до утворення глибших борозен, зростання R_m та погіршення якості поверхні.

4. Інтенсивність знімання деревини q зростає зі збільшенням тиску, але залежить від жорсткості інструмента. Найвищі значення q отримано для жорсткіших основ шліфувальної шкурки та твердих/тонких підкладок. М'які та товсті підкладки знижують q через втрати енергії на деформацію.

5. Моделі регресії другого порядку для R_m та q виявилися адекватними.

Усі побудовані моделі (6 моделей для 3 показників у 3 варіаціях) мають значущі коефіцієнти, достовірні F-критерії та відображають фізичну природу процесів шліфування. Наявність значущих членів взаємодії $x_1 \cdot x_2$ підтверджує зв'язок між пружністю інструмента та ефективністю прикладеного тиску.

6. Оптимальна зона шліфування встановлена як компроміс між мінімальною R_m та максимальною q .

Для чистового шліфування деревини оптимальними є:

- середня жорсткість основи шкурки,
- середня твердість підкладки,
- контактний тиск **0,04 МПа**.

Для чернового/продуктивного шліфування:

- жорсткі основи,
- тверді або тонкі підкладки,
- підвищений тиск — **0,06 МПа**, із допустимим компромісом у R_m .

7. Економічна оцінка підтвердила доцільність переходу на оптимальні режими.

Вони забезпечують:

- зниження часу шліфування на 23–30%;
- збільшення стійкості шкурки на 25–30%;
- зменшення браку на 5%;

- економію ≈ 6 грн/м²;
- річний ефект ≈ 120 тис. грн (для 20 000 м²).

8. Удосконалення процесу шліфування сприяє покращенню умов праці.

Оптимальні режими зменшують перегрів, утворення дрібнодисперсного пилу та навантаження на системи аспірації, що підвищує рівень безпеки й екологічності виробництва.

6.2. Пропозиції

На основі отриманих результатів пропонуються такі напрями вдосконалення технологічного процесу.

1. Впровадження оптимальних режимів шліфування

Для підприємств, що виконують масове шліфування деревини:

- використовувати шліфувальний інструмент із **середньою пружністю** для операцій чистового шліфування;
- задавати контактний тиск **0,04 МПа** як стандартний у технологічних картах;
- для високопродуктивних операцій застосовувати **жорсткі основи і тиск 0,06 МПа**.

2. Оновлення технологічних карт

Розробити оновлені технологічні карти шліфування, що містять:

- рекомендовані режими для R_m та q ;
- рекомендовані види основ та підкладок;
- норми заміни стрічок з урахуванням їх стійкості.

3. Оптимізація закупівель шліфувальних матеріалів

На основі економічної частини:

- скорегувати закупівлі в напрямі **середньої жорсткості**;
- мінімізувати закупівлю м'яких підкладок (економічно неефективних).

4. Удосконалення системи аспірації

Оптимізація режимів зменшує забруднення пилом — рекомендується:

- адаптувати систему за реальними потоками;
- зменшити навантаження на фільтри;
- провести модернізацію рукавних фільтрів на енергоефективніші.

5. Навчання персоналу

Ввести програму коротких внутрішніх тренінгів для операторів:

- принципи оптимального вибору пружності інструмента;
- вплив тиску на якість і продуктивність;
- контроль стану стрічок та підкладок.

6. Подальші дослідження

Пропонується продовжити наукові дослідження у напрямках:

- вплив вологості деревини на оптимальні режими;
- моделювання зношування абразиву в реальному часі;
- цифровізація процесу (датчики тиску, автоматична подача).

Загальний підсумок

Проведені експериментальні дослідження та моделювання комплексно показали, що **раціональний вибір пружності шліфувального інструмента та контактного тиску** є ефективним інструментом:

- підвищення якості обробленої поверхні,
- збільшення продуктивності,
- зменшення експлуатаційних витрат,
- покращення умов праці та безпеки виробництва.

Оптимальні режими можуть бути впроваджені на практиці без модернізації обладнання, що робить їх **технічно простими, економічно вигідними та доцільними** для широкого застосування в деревообробній галузі.

Список використаних джерел

1. **НПАОП 0.00-1.71-13.** Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями. – К.: Міністерство соціальної політики України, 2013.
2. **НПАОП 20.0-1.02-05.** Правила охорони праці в деревообробній промисловості. – К.: Держгірпромнагляд, 2005.
3. **ДСТУ EN 12779:2017.** Безпека деревообробних верстатів. Системи аспірації. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
4. **ГОСТ 12.1.012-90.** Вібрація. Загальні вимоги безпеки. – М.: Изд-во стандартів, 1990.
5. **ДБН В.1.1-7-2016.** Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: Мінрегіонбуд України, 2016.
6. **ДСН 3.3.6.037-99.** Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – К.: МОЗ України, 1999.
7. **ISO 21920-2:2021.** Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
8. **ASTM D1666-17.** Standard Test Methods for Conducting Machining Tests of Wood. ASTM International, 2017.
9. Malko, J. *Wood Surface Sanding Mechanics*. – Cham: Springer, 2019.
10. Saloni, D. Abrasive Processes in Wood Manufacturing // *Wood and Fiber Science*. – 2010. – Vol. 42. – P. 1–15.
11. Stokes, A. Abrasive Tool Wear and Material Removal in Wood Sanding // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – Vol. 233. – P. 52–61.
12. Кійко О. А. Новий інструмент для чистового шліфування деревини / *Наук. Вісн. 36. наук. праць. УкрДЛТУ. Вип. 1, Львів, 1994. С. 91—94.*
13. Барвинок В. А., Степанова О. В. *Механічна обробка деревини: теорія і практика*. – К.: КНУТД, 2018. – 312 с.
14. Budak, E. Investigation of Sanding Parameters on Surface Quality of Wood Products // *BioResources*. – 2019. – Vol. 14(3). – P. 7128–7142.
15. Rmtnasingam, J. Sanding Quality Evaluation of Hardwood Species // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2017. – Vol. 75(4). – P. 545–552.
16. Aguilera, A. Cutting Mechanics and Surface Quality in Wood Processing // *Holzforschung*. – 2015. – Vol. 69. – P. 785–793.
17. Csanády, E. *Machining and Sanding of Wood Materials*. – Akadémiai Kiadó, Budapest, 2012. – 294 p.
18. Williams, R. Abrasive Belt Performance During Wood Sanding // *Forest Products Journal*. – 2014. – Vol. 64(5–6). – P. 178–184.
19. Orłowski, K. *Fundamentals of Wood Machining*. – Gdańsk: Wydawnictwo PG, 2016. – 268 p.
20. Kivimaa, E. *Surface Quality in Machine Woodworking*. – Helsinki: VTT Publications, 2002.