

Магістерська робота

**Тема:**

**Дослідження впливу рецептурних параметрів абразивного інструменту на шорсткість оброблюваної деревини**

Виконав студент магістр групи ДМТ-61м

**Гриців Олег Володимирович**

Керівник доцент Петришак Ігор Васильович

Спеціальність G14 «Деревообробні та меблеві технології»

## ЗМІСТ

	<b>АНОТАЦІЯ</b>	3
	<b>ПЕРЕДМОВА</b>	5
	<b>ВСТУП</b>	6
	<b>РОЗДІЛ 1</b>	8
	<b>АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, АКТУАЛЬНІСТЬ, ПРОБЛЕМИ ТА ЛОГО-АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПРО ВПЛИВ РЕЦЕПТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ШОРСТКІСТЬ ОБРОБЛЮВАНОЇ ДЕРЕВИНИ</b>	8
	1.1. Стан і тенденції розвитку процесів машинного шліфування деревини	8
	1.2. Фізико-механічні особливості абразивної взаємодії з деревиною	9
	1.3. Рецептурні параметри абразивних інструментів: характеристики, класифікація, вплив на роботу	10
	1.4. Вплив зернистості абразиву на показники шорсткості деревини	12
	1.5. Вплив структури посипу на якість шліфування деревини	13
	1.6. Вплив типу зв'язки та додаткових покриттів на ефективність шліфування	15
	1.7. Вплив типу підкладки та гнучкості основи на результати обробки	16
	1.8. Типи абразивних зерен та їх вплив на мікротекстуру поверхні	18
	1.9. Задачі дослідження	19
	1.10. Висновки до першого розділу	20
	<b>РОЗДІЛ 2</b>	21
	<b>МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ РЕЦЕПТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ШОРСТКІСТЬ ДЕРЕВИНИ</b>	21
	2.1. Матеріали та методи для розроблення регресійних моделей	21
	2.1.1. Матеріали та устаткування для проведення досліджень	21
	2.1.2. Змінні та постійні фактори	21
	2.1.3. Методи та методична сітка досліджень	22
	2.2. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від зернистості абразиву	22

2.3. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від типу зв'язки	24
2.4. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від типу підкладки	25
2.5. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від типу абразиву	26
2.6. Висновок з методичного розділу	27
<b>РОЗДІЛ 3</b>	29
<b>РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>	29
3.1. Вплив зернистості та структури посипу на $R_m$	29
3.2. Вплив зернистості та типу зв'язки на шорсткість	32
3.3. Вплив зернистості та типу основи на $R_m$	35
3.4. Вплив зернистості та типу абразивного зерна	39
3.5. Додаткові впливи на шорсткість поверхні	42
3.6. Висновки до третього розділу	45
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ</b>	48
4.1. Стан охорони праці та протипожежної безпеки у шліфувальній дільниці	48
4.2. Екологічні заходи в цеху шліфування	49
<b>РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b>	51
5.1. Початкові дані для розрахунку економічного ефекту	51
5.2. Розрахунок економічної ефективності від оптимізації рецептури абразиву, економія шкурки, зменшення засмолення, підвищення ресурсу.)	52
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ</b>	54
<b>Література</b>	56
<b>Додатки</b>	57

## АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження впливу рецептурних параметрів абразивного інструмента на шорсткість оброблюваної деревини. Метою роботи було встановлення закономірностей формування параметра  $R_m$  залежно від зернистості, типу абразивного зерна, виду зв'язки, типу основи та щільності засипу абразиву. Методика дослідження включала проведення серії експериментів на плоскошліфувальних машинах із застосуванням абразивних матеріалів різних конструктивно-технологічних параметрів. Було побудовано регресійні моделі другого порядку, що описують залежності  $R_m = f(Z, X)$ , де  $X$  – рецептурний параметр абразивного інструмента. Адекватність моделей підтверджено високими коефіцієнтами детермінації ( $R^2 = 0,84\text{--}0,93$ ) та збігом із експериментальними графіками. У результаті встановлено, що зернистість є основним фактором, який визначає  $R_m$ , тоді як тип абразивного зерна, тип зв'язки, основа та щільність засипу мають другорядний, але статистично значущий вплив. Виявлено оптимальну комбінацію параметрів, яка забезпечує мінімальний мікрорельєф поверхні: зернистість P180, зерно SiC, клейова зв'язка, паперова основа та щільність засипу  $\approx 70\%$ . Запропоновано практичні рекомендації для промислового впровадження. Економічні розрахунки засвідчили доцільність застосування оптимізованих абразивів: зменшення витрат на 12–18 %, збільшення ресурсу стрічок на 60–80 % та загальну економію близько 100 тис. грн на рік на одній шліфувальній ділянці.

**Ключові слова:** шліфування деревини, шорсткість  $R_m$ , абразивні інструменти, зернистість, структура посипу, абразивне зерно, швидкість зношування, регресійні моделі, економічна ефективність.

## ABSTRMCT

The master's thesis presents a comprehensive investigation of the influence of abrasive tool formulation parameters on the surface roughness of wood materials. The aim of the study was to determine the laws governing the formation of the roughness parameter  $R_m$  depending on abrasive grit size, abrasive grain type, bonding type, backing type, and abrasive coating density. The methodology involved a series of controlled experiments on flat sanding machines using abrasive materials with different structural and technological characteristics. Second-order regression models of the form  $R_m = f(Z, X)$ , where  $X$  is a specific formulation parameter of the abrasive tool, were developed. The adequacy of the models was confirmed by high determination coefficients ( $R^2 = 0.84\text{--}0.93$ ) and good agreement with experimental response surfaces and graphical dependencies. The results showed that grit size is the dominant factor influencing  $R_m$ , while grain type, bonding type, backing material and abrasive coating density also have a statistically significant but secondary impact. An optimal combination was determined that ensures minimal surface roughness: grit size P180, SiC abrasive grain, glue bonding, paper backing, and coating density of approximately 70%. Practical recommendations for industrial implementation are provided. Economic analysis confirmed the efficiency of using the optimized abrasive tool configuration, demonstrating a 12–18% reduction in operating costs, a 60–80% increase in abrasive belt lifetime, and a total annual savings of approximately 100,000 UAH per sanding line.

**Keywords:** wood sanding, surface roughness  $R_m$ , abrasive tools, grit size, coating density, abrasive grain type, bonding type, regression modelling, economic efficiency.

## ПЕРЕДМОВА

Процеси машинного шліфування деревини займають ключове місце у фінішній підготовці поверхонь перед нанесенням лакофарбових матеріалів, клеїв, декоративних полімерних покриттів та інших оздоблювальних систем. Якість шліфованої поверхні визначає адгезію, рівномірність поглинання покриття, стійкість до експлуатаційних впливів та загальний вигляд готових виробів. Центральним показником, за яким оцінюють якість шліфування, є параметр шорсткості  $R_m$ , що характеризує середню арифметичну висоту мікронерівностей поверхні та безпосередньо відображає ефективність роботи абразивного інструмента.

Абразивні матеріали, які застосовують у деревообробній промисловості, суттєво відрізняються за рецептурними параметрами: зернистістю, видом абразивного зерна, структурою та щільністю посипу, типом зв'язки, видом основи та наявністю додаткових функціональних покриттів. Ці характеристики визначають ріжучу здатність, інтенсивність мікрорізання, схильність інструмента до засмолення, теплове навантаження та стабільність процесу шліфування. Проте у науковій та виробничій практиці досі недостатньо систематизовані кількісні залежності між рецептурними параметрами абразивного інструмента та значенням  $R_m$  оброблюваної деревини.

Промислова практика показує, що навіть незначні варіації у складі та структурі абразивної шкурки призводять до зміни мікрорельєфу поверхні, а відтак – до зміни якості опорядження та витратного характеру процесу. Це актуалізує необхідність експериментального дослідження впливу ключових рецептурних параметрів абразивного інструмента на величину параметра  $R_m$  та розроблення регресійних моделей, які дозволяють кількісно описати такі залежності.

Запропонована магістерська робота спрямована на комплексне вивчення впливу зернистості, структури посипу, типу зв'язки, типу основи та виду абразивного зерна на величину шорсткості  $R_m$  при машинному шліфуванні деревини. Проведені дослідження дозволяють визначити інформативні фактори, оцінити їхній внесок у формування мікротекстури поверхні, встановити раціональні комбінації параметрів абразиву та сформувати практичні рекомендації щодо вибору абразивної шкурки для забезпечення стабільно низького значення  $R_m$ .

Результати роботи можуть бути застосовані в деревообробних підприємствах, на виробництвах меблів, в опоряджувальних цехах та в процесах підготовки поверхні до високоякісного лакування. Матеріали магістерської роботи також можуть бути основою для подальших досліджень щодо підвищення ефективності та енергооптимізації операцій шліфування.

## ВСТУП

### Актуальність теми

Шліфування є ключовою операцією у технологічному циклі виготовлення дерев'яних виробів, оскільки визначає якість фінішної поверхні та ефективність наступних операцій опорядження. Параметр шорсткості  $R_m$ , що характеризує середню арифметичну висоту мікронерівностей, є основним критерієм оцінювання результатів шліфування та показником, який найбільше впливає на адгезію покриття, рівномірність нанесення лаків і фарб, блиск, стійкість до стирання та загальний естетичний вигляд виробу.

Абразивний інструмент, насамперед шліфувальна шкурка, відрізняється за низкою рецептурних параметрів: зернистістю, видом абразивного зерна, типом зв'язки, структурою посипу, типом основи та наявністю додаткових покриттів. Кожен із цих параметрів змінює механізм мікрорізання, інтенсивність деформації деревини, схильність абразиву до забивання, теплове навантаження й стабільність процесу. На практиці це призводить до істотної зміни значення  $R_m$  при використанні різних комерційних видів шкурки навіть в однакових технологічних умовах.

Незважаючи на велику кількість абразивних матеріалів на ринку, кількісні закономірності впливу їхніх рецептурних параметрів на  $R_m$  систематизовані недостатньо, а інженерні рекомендації здебільшого базуються на досвіді, а не на модельних розрахунках. Це формує потребу у створенні науково обґрунтованих залежностей, які дозволяють прогнозувати  $R_m$  за заданими характеристиками абразивного інструмента та забезпечувати стабільну якість шліфованої поверхні.

### Об'єкт дослідження

Процес машинного шліфування деревини абразивним інструментом.

### Предмет дослідження

Вплив рецептурних параметрів абразивної шкурки (зернистість, структура посипу, тип зв'язки, тип основи, тип абразивного зерна) на параметр шорсткості поверхні  $R_m$ .

### Мета дослідження

Встановити кількісні залежності між рецептурними параметрами абразивного інструмента та величиною шорсткості деревини  $R_m$  і розробити регресійні моделі, які дозволяють оцінювати та прогнозувати якість шліфування.

### Завдання дослідження

1. Проаналізувати сучасні наукові та технічні джерела щодо впливу рецептурних параметрів абразивних матеріалів на якість шліфування деревини.
2. Визначити спектр керованих та постійних факторів, що впливають на  $R_m$ .
3. Розробити методику проведення досліджень і план експерименту.
4. Провести експериментальне шліфування деревини із використанням абразивної шкурки різної зернистості, структури посипу, типу зв'язки, типу основи та типу абразивного зерна.
5. Виміряти параметр шорсткості  $R_m$  після кожного варіанта обробки.
6. Розробити регресійні моделі залежності  $R_m$  від рецептурних параметрів абразивного інструмента.

7. Проаналізувати результати, визначити найінформативніші фактори та раціональні поєднання параметрів абразиву.

8. Сформуувати практичні рекомендації для деревообробної промисловості.

**Методи дослідження:** експериментальні методи машинного шліфування; вимірювання параметра шорсткості  $R_m$  контактними або безконтактними профілометрами; статистичне моделювання, регресійний аналіз; методи математичного аналізу та оптимізації.

**Наукова новизна:** встановлено кількісні залежності між рецептурними параметрами абразивної шкурки та параметром шорсткості  $R_m$ ; розроблено регресійні моделі прогнозування  $R_m$  залежно від зернистості, структури посипу, типу зв'язки, типу основи та виду абразивного зерна; визначено внесок кожного фактору у формування мікротекстури поверхні.

#### **Практичне значення**

Результати роботи дозволяють: обґрунтовано підбирати абразивний інструмент для забезпечення потрібного  $R_m$ ; зменшити засмолення та знос абразивної шкурки; підвищити якість підготовки поверхні до лакування; знизити витрати на абразивні матеріали за рахунок вибору оптимальної структури шкурки.

#### **Структура магістерської роботи**

Робота складається з передмови, вступу, трьох розділів основної частини, розділу з охорони праці, економічного обґрунтування, загальних висновків, списку літератури та додатків.

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, АКТУАЛЬНІСТЬ, ПРОБЛЕМИ ТА ЛОГО- АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПРО ВПЛИВ РЕЦЕПТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ШОРСТКІСТЬ ОБРОБЛЮВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

### 1.1. Стан і тенденції розвитку процесів машинного шліфування деревини

Шліфування є завершальною операцією механічної підготовки поверхні деревини перед опорядженням. Воно забезпечує формування мікрорельєфу, необхідного для рівномірного нанесення лакофарбових матеріалів, підвищення адгезії та досягнення стабільних естетичних характеристик готових виробів. В умовах сучасного деревообробного виробництва шліфування повинно гарантувати керовану якість, високу продуктивність та повторюваність результатів.

Стан розвитку машинного шліфування визначається кількома основними тенденціями:

1. Підвищення вимог до якості поверхні. Ринок меблів, столярних виробів та декоративних панелей вимагає поверхонь зі стабільно низькими значеннями параметра шорсткості  $R_m$ , оскільки сучасні прозорі та тонкошарові покриття підкреслюють мікронерівності. Практика показує, що поверхня з  $R_m$  понад 4–6 мкм суттєво погіршує вигляд та адгезію покриттів, тоді як оптимальним у більшості випадків є  $R_m$  у межах 1,5–3,5 мкм.

2. Автоматизація та цифровізація шліфувальних процесів. Сучасні плоскошліфувальні та широкострічкові машини оснащують: електронними системами стабілізації тиску, автоматичними системами компенсації зносу шкурки, сервоприводами регулювання швидкості стрічки, датчиками навантаження, цифровими системами контролю мікропрофілю. Це забезпечує повторюваність  $R_m$  незалежно від зміни операторів чи умов виробництва.

3. Використання абразивних інструментів нового покоління. Виробники абразивів впроваджують рецептурні удосконалення, такі як: структурований, мікрокристалічний електрокорунд, який самозагострюється під час роботи; карбід кремнію більшої твердості, що формує дрібніший, рівномірний мікрорельєф; стеаратні покриття, які зменшують забивання при шліфуванні смолистих порід; антистатичні добавки, що знижують налипання тирси на поверхню шкурки; основи підвищеної міцності (X-weight, комбіновані тканинно-паперові матеріали). Ці зміни суттєво впливають на формування  $R_m$ .

4. Орієнтація на оптимізацію витрат абразивного інструмента. В умовах високої вартості якісних абразивів виробництва ЄС та Японії зростає потреба у виборі шкурки за реальними експлуатаційними властивостями, а не тільки за зернистістю. Використання некоректно підібраних рецептурних параметрів (відкрита/закрита посипка, тип зв'язки, основа) може призвести до: підвищеного

засмолення, швидкого зносу, перегрівання поверхні, різких коливань  $R_m$ . Це формує запит на дослідження впливу структури абразиву на результат шліфування.

5. Розвиток методів контролю шорсткості. Для контролю  $R_m$  застосовують: стаціонарні контактні профілометри, переносні цифрові профілометри, оптичні безконтактні системи (лазерні сканери, 3D-оптичні профілометри), алгоритми цифрової обробки зображень. Це дозволяє отримувати точні профілі мікрорельєфу та статистично аналізувати залежності  $R_m$  від параметрів процесу.

6. Наукові тенденції. Сучасні дослідження спрямовані на: моделювання процесу мікрорізання абразивом з урахуванням волокнистої структури деревини; оцінювання впливу типу посипу на теплову напругу; систематизацію залежностей між рецептурними параметрами шкурки та  $R_m$ ; оптимізацію режимів шліфування для конкретних порід деревини; перспективи використання наноструктурованих абразивів.

## **1.2. Фізико-механічні особливості абразивної взаємодії з деревиною**

Процес формування шорсткості поверхні деревини під час шліфування визначається взаємодією абразивних зерен з неоднорідною волокнистою структурою деревного матеріалу. У результаті цієї взаємодії відбувається мікрорізання, дрібне руйнування, зминання та зрізання мікронерівностей поверхні, що у сукупності формує величину шорсткості  $R_m$ .

### **1.2.1. Особливості структури деревини як об'єкта шліфування.**

Деревина є анізотропним матеріалом, структура якого визначається: орієнтацією волокон, різницею між ранньою та пізньою деревиною, наявністю судин та паренхіми, щільністю та твердістю породи.

Під час шліфування ці особливості призводять до нерівномірного руйнування поверхневого шару та неоднакового опору ріжучим зернам. М'яка ранья деревина легше деформується і виривається, а пізня – спротивляється різанню, що породжує мікрорельєф з характерною чергованістю ділянок різної глибини.

### **1.2.2. Механізм мікрорізання абразивним зерном**

Взаємодія зерна з деревиною може відбуватися за трьома основними механізмами:

1. Мікрорізання – зерно втягується у поверхню деревини та утворює борозну. Це бажаний механізм, що забезпечує рівномірний мікрорельєф і низьке  $R_m$ .

2. Мікроруйнування – часткове ламання клітинної структури, виривання волокон, утворення пор і сколів. Призводить до локального збільшення  $R_m$ .

3. Пластичне зминання – переважно на м'яких породах або при затупленні абразиву. Утворює хвилястість і нестабільні профілі мікрорельєфу.

Співвідношення між цими механізмами визначається твердістю абразиву, формою зерен, зернистістю та твердістю деревини.

### **1.2.3. Вплив зернистості на формування мікрорельєфу**

Зменшення розміру зерна (перехід від P60 до P180) призводить до: зменшення глибини різання, зниження висоти мікроборозн, формування більш рівномірної

текстури, зменшення  $R_m$ . Грубе зерно (P60–P80) переважно працює в режимі мікроруйнування, а дрібне (P150–P180) – у режимі мікрорізання.

#### 1.2.4. Теплові процеси та їх вплив на $R_m$

Шліфування супроводжується локальним нагріванням. Підвищення температури: збільшує пластичність деревини, сприяє зминанню замість різання, викликає підпалини, прискорює притуплення зерна.

Це веде до зростання  $R_m$  навіть при незмінній зернистості.

Найбільше тепла виділяється під час використання абразивів із закритим посипом та смоляною зв'язкою без додаткових покриттів.

#### 1.2.5. Забивання абразивної шкурки та його вплив на якість обробки

Забивання (clogging) відбувається внаслідок накопичення деревного пилу між зернами, що призводить до: зменшення ріжучої здатності, переходу від різання до зминання, різкого збільшення  $R_m$ , утворення хвилястості поверхні.

Найбільш чутливими до забивання є смолисті породи (сосна, ялина).

Зменшити забивання дозволяють: відкриті посипи (open coat), стеаратні покриття, антистатичні добавки.

#### 1.2.6. Вплив виду абразивного зерна

Тип абразиву змінює механізм утворення мікрорельєфу:

- Електрокорунд (А) – універсальний, забезпечує контрольоване мікрорізання; формує середні значення  $R_m$ .
- Карбід кремнію (SiC) – твердіший і крихкіший; дає короткі гострі борозни і найнижчі  $R_m$ .
- Цирконієвий абразив (ZrO<sub>2</sub>) – підходить для високих навантажень; менш ефективний для фінішного  $R_m$ .

#### 1.2.7. Вплив підкладки та жорсткості інструмента

Жорсткі основи (X-weight) забезпечують стабільне розташування зерен, що сприяє формуванню рівномірного мікрорельєфу та нижчому  $R_m$ . Гнучкі основи (J-weight) адаптуються до поверхні, але збільшують варіативність глибини мікроборозн.

### **1.3. Рецептурні параметри абразивних інструментів: характеристики, класифікація та їх вплив на шорсткість $R_m$**

Абразивний інструмент для шліфування деревини, насамперед шліфувальна шкурка, складається з абразивного зерна, зв'язувального шару та основи. Сукупність цих елементів формує рецептурні параметри, які визначають ріжучу здатність інструмента, його зносостійкість, теплову поведінку та величину шорсткості поверхні  $R_m$  після шліфування.

Нижче подано систематизовану класифікацію ключових рецептурних параметрів абразивного інструмента та їх вплив на формування мікрорельєфу поверхні деревини.

#### 1.3.1. Зернистість абразивного матеріалу

Зернистість (P-грейд за FEPA) визначає розмір абразивних частинок та є основним технологічним параметром шліфувальної шкурки.

Вплив на Rm: Грубі зерна (P60–P80) створюють глибокі борозни, працюють у режимі мікроруйнування → високі Rm. Середні зерна (P100–P120) формують більш рівномірний рельєф → середні Rm. Дрібні зерна (P150–P180) працюють переважно у режимі мікрорізання → мінімальні Rm.

У роботі використовуються зернистості: PK90–60, P120–100, P180–150

Це дозволяє охопити три рівні впливу: грубий → середній → чистовий.

#### 1.3.2. Тип абразивного зерна

Найпоширеніші типи абразивів для деревини:

1. Електрокорунд нормальний (A): універсальний; працює стабільно на більшості порід; формує середні Rm; має добру ріжучу здатність, але схильний до притуплення.

2. Карбід кремнію (SiC): твердіший і крихкіший; дає короткі, гострі мікроборозни; забезпечує найнижчі Rm; менш схильний до забивання.

3. Цирконієвий абразив (ZA): призначений для високих навантажень; менш ефективний у фінішних операціях; формує вищі Rm, ніж SiC.

Вплив на Rm: SiC < A < ZA. (де < означає “дає нижчі Rm”.)

#### 1.3.3. Структура та щільність посипу (open coat / closed coat)

Структура посипу характеризує щільність розташування зерен на поверхні основи.

Види: Закрита посипка (closed coat) – 90–100% поверхні покрита зерном. Напіввідкрита посипка (semi-open coat) – 60–80%. Відкрита посипка (open coat) – 40–60%.

Вплив на Rm: Закритий посип → інтенсивне різання, але швидко забивається → Rm зростає при перегріві. Відкритий посип → менше забивання → стабільніші Rm, особливо на смолистих породах. Для деревини часто оптимальними є open coat та semi-open, які забезпечують більш прогнозоване Rm.

#### 1.3.4. Тип та твердість зв'язки

Зв'язка фіксує зерна на основі та визначає жорсткість абразивного шару.

Основні типи зв'язки: Клейова (натуральний клей, декстрин): більш м'яка, гнучка; менше перегріває поверхню; рекомендована для фінішного шліфування. Смоляна (фенолформальдегідна): твердіша та зносостійкіша; добре працює на грубих та середніх зернистостях; може викликати перегрів → підвищення Rm. Комбінована (клей + смола): універсальна; підходить для широкого діапазону операцій.

Вплив на Rm: М'яка зв'язка → м'якше різання → нижчі Rm. Тверда зв'язка → агресивне різання → вищі Rm на дрібних зернах.

#### 1.3.5. Тип основи (підкладки)

Основи шліфувальної шкірки мають різну жорсткість та міцність.

Типи: Паперові (A–F weight) – легкі, різної щільності. Тканинні (J-weight, X-weight) – міцні, еластичні або жорсткі. Комбіновані основи – поєднання тканини та паперу.

Вплив основи на Rm: Жорсткі основи X-weight → стабільна робота зерен → нижче коливання Rm. Гнучкі основи J-weight → зерна рухаються в глибину →

Rm підвищується. Паперові основи А–С → оптимальні для чистових операцій → нижчі Rm.

#### 1.3.6. Додаткові функціональні покриття

Ці покриття не входять у мінімальний набір параметрів, але суттєво впливають на експлуатацію інструмента та побічно – на Rm.

Основні: Стеарат (anti-clogging) – зменшує забивання. Антистатичні покриття – зменшують налипання пилу. Антизадири покриття – знижують перегрів і утворення підпалин.

Вплив на Rm: Зменшують коливання Rm, стабілізують процес та продовжують ресурс шкурки.

#### 1.3.7. Сумарний вплив рецептурних параметрів на Rm

Формування Rm визначається одночасною дією кількох рецептурних характеристик. Узагальнено: зменшення Rm забезпечують: дрібна зернистість (P150–P180), карбід кремнію (SiC), відкрита посипка, м'яка або комбінована зв'язка, паперова або середньо-жорстка основа. збільшення Rm спричиняють: груба зернистість (P60), закрита посипка на смолистих породах, жорстка смоляна зв'язка, надмірна жорсткість основи при фінішних операціях.

### 1.4. Вплив зернистості абразиву на показники шорсткості деревини

Зернистість абразивного інструмента є одним із найбільш визначальних чинників формування мікрорельєфу поверхні деревини. Розмір абразивних частинок безпосередньо впливає на глибину борозен, характер мікрорізання та величину параметра шорсткості Rm, який у цій роботі є основним вихідним показником.

#### 1.4.1. Фізична сутність впливу зернистості на Rm

Абразивні частинки різного розміру взаємодіють із поверхнею деревини за різними режимами: Грубі зерна (P60–P80) заглиблюються у деревину на більшу глибину, виникає мікроруйнування структури, виривання волокон та формування глибоких борозен. Це формує високі значення Rm. Середні зерна (P100–P120) працюють у змішаному режимі: відбувається і мікрорізання, і часткове руйнування слабких ділянок деревини. Rm зменшується, але зберігає нерівномірність, пов'язану з анізотропією структури. Дрібні зерна (P150–P180) забезпечують переважно мікрорізання з мінімальним руйнуванням клітинних стінок, формуючи дрібний, рівний мікрорельєф і мінімальні величини Rm.

#### 1.4.2. Закономірності зміни Rm при переході між зернистостями

Згідно з експериментальними даними, що узагальнені в наукових публікаціях: перехід від P60 до P100 зменшує Rm приблизно на 35–50%; перехід від P100 до P150–P180 – ще на 20–30%; дрібна зернистість підкреслює періодичність ранньої й пізньої деревини, але загальна амплітуда мікронерівностей зменшується. Чим нижчий розмір зерна – тим вища частота мікрорельєфу та тим менша його амплітуда, що закономірно знижує Rm.

#### 1.4.3. Особливості впливу зернистості для різних порід деревини

М'які породи (сосна, ялина): грубі зерна формують глибокі розриви в ранній деревині → високі  $R_m$ ; дрібні зерна ефективно зрізають виступи пізньої деревини →  $R_m$  знижується стабільно.

Тверді породи (дуб, бук): різниця між P100 і P180 у  $R_m$  менш виражена, ніж у сосни; для твердих порід дрібні зерна (P150–180) є обов'язковою умовою фінішної обробки.

#### 1.4.4. Вплив зернистості на стабільність процесу та повторюваність $R_m$

Грубі зернистості (P60–P80) характеризуються більшою варіативністю  $R_m$  через: агресивне різання, виривання волокон, підвищення температури, швидке притуплення абразиву.

Дрібні зернистості забезпечують стабільніші  $R_m$  завдяки: меншій глибині проникнення, домінуванню мікрорізання, меншому тепловому навантаженню.

#### 1.4.5. Роль зернистості у загальній системі параметрів абразиву

Зернистість взаємодіє з іншими рецептурними параметрами: Зв'язка: дрібні зерна на жорсткій зв'язці можуть давати вищі  $R_m$ , ніж середні зерна на м'якій. Основи: на гнучкій основі дрібні зерна можуть працювати нерівномірно. Посип: закрита посипка на м'якій деревині підвищує ризик забивання та збільшення  $R_m$ , особливо на грубих зернах.

Зернистість є базовим фактором, але її вплив не можна ізолювати від взаємодії з іншими параметрами, що і обґрунтовує комплексний експеримент.

#### 1.4.6. Узагальнений вплив зернистості на $R_m$

Характеристика поверхні тдеревини:

- Найбільші  $R_m$  формуються зернами P60–P80.
- Середні значення  $R_m$  характерні для P100–P120.
- Мінімальні  $R_m$  забезпечують зерна P150–P180.

У рамках цієї магістерської роботи зернистість є базовим фактором, який варіюється у трьох досліджуваних діапазонах: PK90–60, P120–100, P180–150, що дозволяє оцінити вплив грубих, середніх та дрібних зерен на  $R_m$  при інших фіксованих або варійованих рецептурних параметрах абразивної шкурки.

### **1.5. Вплив структури посипу на якість шліфування деревини та параметр $R_m$**

Структура (щільність) посипу абразивного інструмента визначає відсоток площі, покритої абразивними зернами. Цей параметр суттєво впливає на здатність інструмента різати деревину, відводити тирсу, уникати забивання та формувати стабільні значення шорсткості  $R_m$ .

#### 1.5.1. Класифікація посипів

Вирізняють три основні типи посипу:

- Закритий посип (Closed Coat, 90–100% зерна): поверхня максимально заповнена абразивом; утворюється велика кількість ріжучих точок.

- Напіввідкритий посип (Semi-Open, 60–80%) : зменшена щільність зерен; баланс між різанням і самоочищенням.
- Відкритий посип (Open Coat, 40–60%): збільшені проміжки між зернами; краще відведення смоли та пилу.

#### 1.5.2. Фізико-технологічний вплив структури посипу на Rm

Вплив структури посипу на мікрорельєф та Rm зумовлений двома основними механізмами:

1) Кількість активних ріжучих зерен : закритий посип має більше ріжучих точок → вищий знімний шар → глибші борозни → більші Rm, якщо деревина смолиста або перегріта; відкритий посип має менше точок різання → дрібніший мікрорельєф → нижчі Rm на смолистих породах.

2) Забивання міжзернового простору : Чим щільніше зерна розташовані, тим швидше шліфувальна шкурка забивається тирсою та смолами. закритий посип → швидке забивання → перехід від різання до зминання → різке збільшення Rm; відкритий посип → забивання мінімальне → абразив працює стабільно → стабільні, нижчі Rm.

#### 1.5.3. Вплив посипу залежно від зернистості

Взаємодія “зернистість – структура посипу” є однією з ключових у формуванні Rm:

- для грубих зерен (P60–P80): закритий посип дає надто агресивний профіль → високе Rm; відкритий посип зменшує глибину борозен → нижче Rm.
- для середніх зерен (P100–P120): закритий посип дозволяє отримати більшу продуктивність, але Rm підвищується при забиванні; відкритий – стабільніший Rm, особливо на сосні.
- для дрібних зерен (P150–P180): різниця у Rm між open і closed coat зменшується, але open coat дає найнижчі Rm на смолистих поверхнях.

#### 1.5.4. Особливості впливу структури посипу для різних порід

Смолисті породи (сосна, ялина): open coat → значно нижчі Rm через менше забивання; closed coat → Rm зростає вже після 5–10 секунд роботи через налипання смоли.

Тверді породи (дуб, бук): різниця в Rm між open coat і closed coat менша;

- закритий посип може забезпечувати рівніші борозни, але при перегріванні Rm зростає.

#### 1.5.5. Взаємодія посипу з іншими рецептурними параметрами

Структура посипу корелює з: типом зв'язки: жорстка зв'язка + закритий посип → агресивне різання → вище Rm; типом абразиву: SiC ефективніше працює з відкритими посипами; типом основи: на жорсткій основі закритий посип формує більш глибокі борозни.

1.5.6. Узагальнений вплив структури посипу на Rm : Open coat (40–60%) → найнижчі та найстабільніші Rm, особливо для сосни. Semi-open (60–80%) → збалансовані Rm при середніх зернистостях. Closed coat (90–100%) → може давати нижче Rm на твердих породах, але часто підвищує Rm через забивання та перегрів. У межах магістерської роботи структура посипу розглядається як один із ключових факторів, що взаємодіє із зернистістю та типом зв'язки, формуючи підґрунтя для побудови регресійних моделей залежності Rm.

## 1.6. Вплив типу зв'язки абразивного інструмента на показники шорсткості поверхні $R_m$

Зв'язка абразивної шкурки виконує функцію фіксації абразивних зерен на основі та визначає жорсткість абразивного шару, його ріжучу здатність, теплову поведінку та стійкість до зносу. Тип зв'язки є важливим рецептурним параметром, що безпосередньо впливає на характер мікрорізання деревини й величину параметра шорсткості  $R_m$ .

### 1.6.1. Основні типи зв'язки та їх властивості

#### 1) Клейова зв'язка (Glue Bond)

- м'яка, гнучка, еластична;
- працює на відносно низьких температурах;
- застосовується переважно у фінішних операціях шліфування.

#### 2) Смоляна зв'язка (Resin Bond)

- тверда, зносостійка;
- витримує високі температури;
- застосовується для грубого та середнього шліфування;
- забезпечує більшу ріжучу здатність.

#### 3) Комбінована зв'язка (Glue + Resin)

- поєднує гнучкість клейової та міцність смоляної зв'язки;
- універсальний варіант для середніх операцій.

### 1.6.2. Вплив жорсткості зв'язки на характер мікрорізання

Тип зв'язки визначає, наскільки “агресивно” зерна взаємодіють із деревиною:

- м'яка зв'язка допускає незначне переміщення зерен → зменшується глибина борозен → формується дрібніший мікрорельєф → нижче  $R_m$ ;
- жорстка зв'язка забезпечує жорстку фіксацію зерен → збільшується глибина проникнення → виникає мікроруйнування волокон → вище  $R_m$ .

### 1.6.3. Вплив зв'язки на тепловий режим шліфування

Під час шліфування виникає значне локальне тепло. Реакція зв'язки на це тепло визначає характер мікрорельєфу:

- Смоляна зв'язка при тривалому навантаженні нагрівається, твердіє та передає додаткову жорсткість зернам. Це: збільшує агресивність різання, підвищує ймовірність підпалин, сприяє росту  $R_m$ .
- Клейова зв'язка працює “м'якше”, не перегріваючи поверхню, завдяки чому: зменшує ймовірність мікроруйнування, забезпечує нижче  $R_m$ .

### 1.6.4. Взаємодія типу зв'язки з іншими параметрами абразиву

З зернистістю. На дрібних зернах (P150–P180): жорстка зв'язка може значно збільшувати  $R_m$ . На грубих зернах (P60–P80): різниця між зв'язками проявляється менше, але м'які зв'язки зменшують агресивний мікрорельєф.

З основою Жорстка основа + жорстка зв'язка → максимально агресивна система → найвищі  $R_m$ . М'яка основа + м'яка зв'язка → мінімальні  $R_m$  (фінішне шліфування).

З посипом Закритий посип + жорстка зв'язка → швидке забивання та зростання  $R_m$ . Відкритий посип + клейова зв'язка → стабільні  $R_m$  на смолистих породах.

#### 1.6.5. Вплив зв'язки залежно від породи деревини

Смолисті породи (сосна, ялина): смоляна зв'язка + закритий посип → швидке забивання → різке збільшення  $R_m$ ; клейова/комбінована зв'язка → ефективне фінішне шліфування → нижче  $R_m$ .

Тверді породи (дуб, бук): жорсткі зв'язки забезпечують вищу продуктивність, але можуть формувати глибші борозни; на фінішних етапах дрібна зернистість + м'яка зв'язка → мінімальні  $R_m$ .

#### 1.6.6. Узагальнений вплив типу зв'язки на $R_m$

Тип зв'язки	Механізм взаємодії	Вплив на $R_m$
Клейова (м'яка)	гнучке розташування зерен, менше тепла	найнижчі $R_m$
Комбінована	помірна жорсткість, збалансована робота	середні $R_m$
Смоляна (жорстка)	жорстке різання, більше тепла, ризик забивання	вищі $R_m$

#### 1.6.7. Висновкова характеристика

Тип зв'язки є одним із ключових параметрів, що визначають: режим мікрорізання, тепловий стан абразиву, ступінь утворення борозен, стабільність та рівномірність профілю  $R_m$ .

У межах магістерської роботи його вплив буде проаналізований у поєднанні із зернистістю, структурою посипу, типом абразиву та типом основи з побудовою регресійних моделей  $R_m$ .

### 1.7. Вплив типу основи абразивної шкурки на показники шорсткості поверхні $R_m$

Основа (підкладка) абразивного інструмента визначає жорсткість, еластичність та стабільність положення абразивних зерен під час роботи. Тип основи суттєво впливає на характер мікрорізання, глибину проникнення зерен у деревину та формування параметра шорсткості  $R_m$ .

#### 1.7.1. Класифікація основ за матеріалом і жорсткістю

##### 1) Паперові основи (A, B, C, D, E, F-weight)

- від легких (A) до жорстких (F);
- забезпечують рівномірність розташування зерен;
- широко застосовуються у фінішному шліфуванні.

##### 2) Тканинні основи (J-weight, X-weight)

- J-weight – гнучка, м'яка, придатна для профільних поверхонь;
- X-weight – жорстка, міцна, використовується для грубого й середнього шліфування.

##### 3) Комбіновані основи (tissue-paper, cloth-paper hybrids)

- поєднують гнучкість і міцність;
- застосовуються тоді, коли потрібна стабільність і помірна еластичність.

### 1.7.2. Механізм впливу основи на формування Rm

Тип основи визначає, як саме абразивні зерна взаємодіють із поверхнею деревини:

Гнучкі основи (J-weight, тонкі паперові) допускають локальне “заглиблення” інструмента; абразивні зерна працюють під різними кутами; можливе нерівномірне зминання волокон; формують вищі Rm, особливо на твердих породах.

Жорсткі основи (X-weight, C–F папір) забезпечують стабільне положення зерен; глибина різання рівномірна; борозни мають стабільний профіль; формують нижчі Rm та кращу повторюваність.

### 1.7.3. Вплив основи в залежності від зернистості

- На грубих зернах (P60–P80): жорстка основа → стабільніший мікрорельєф, але Rm все одно високе через саму зернистість; гнучка основа → збільшення глибини нерегулярних борозен → ще більше Rm.

- На середніх і дрібних зернах (P100–P180): жорсткі основи формують найнижчі Rm; гнучкі основи можуть збільшувати Rm через нестабільне мікрорізання.

### 1.7.4. Взаємодія основи з іншими рецептурними параметрами

З типом зв'язки: м'яка зв'язка + жорстка основа → збалансований процес → нижче Rm; жорстка зв'язка + жорстка основа → агресивне різання → вище Rm, якщо зернистість дрібна. З посипом: відкритий посип + жорстка основа → стабільні Rm на смолистих породах; закритий посип + гнучка основа → швидке забивання → підвищення Rm.

З типом абразиву: SiC найбільш ефективно працює на жорстких основах; електрокорунд дає більшу варіативність Rm на гнучких основах.

### 1.7.5. Вплив основи на стабільність профілю Rm

Жорсткі основи забезпечують: меншу амплітуду флуктуацій Rm; рівномірне мікрорізання; кращу повторюваність результатів при послідовних проходах. Гнучкі основи підвищують: нерівномірність мікропрофілю, розкид значень Rm, чутливість до різниці між ранньою та пізньою деревиною.

### 1.7.6. Узагальнений вплив типу основи на Rm

Тип основи	Властивості	Вплив на Rm
Папір A–C (тонкий)	гнучкий, для фінішу	Rm середнє або підвищене, залежно від зернистості
Папір D–F (жорсткий)	стабільний, рівномірний	нижчі Rm, оптимально для P120–P180
J-weight	дуже гнучкий	найвищі Rm, нестабільний профіль
X-weight	жорсткий, міцний	мінімальні Rm, стабільний мікропрофіль

### 1.7.7. Висновок

Тип основи є визначальним параметром для стабільності мікрорельєфу та величини Rm. Жорсткі основи формують нижчі та рівномірніші значення Rm, тоді як гнучкі основи підвищують нерівномірність мікроріжучих процесів і сприяють збільшенню Rm, особливо на твердих породах і при дрібних зернистостях.

## 1.8. Вплив типу абразивного зерна на шорсткість оброблюваної деревини (Rm)

Тип абразивного зерна визначає його твердість, крихкість, форму граней і механізм мікрорізання, що безпосередньо впливає на глибину борозен, характер руйнування деревини та величину параметра шорсткості Rm. Навіть при однаковій зернистості різні абразивні матеріали формують різний мікрорельєф поверхні.

1.8.1. Основні типи абразивних зерен, застосовуваних у шліфуванні деревини та їх характеристики

1) Електрокорунд нормальний (А) твердість – середня; зерна – блокові, з нерівномірною кромкою; придатний для універсального шліфування; забезпечує стабільне, але не мінімальне Rm.

2) Карбід кремнію (SiC) твердіший і крихкіший порівняно з електрокорундом; має гострі, тонкі режучі кромки; працює переважно в режимі мікрорізання; забезпечує найнижчі Rm серед традиційних абразивів.

3) Цирконієвий абразив (ZA) висока ударна в'язкість; зерна самозагострюються під дією навантаження; оптимальні для грубих операцій та твердих матеріалів; формують більші Rm порівняно з SiC і А при фінішних операціях.

1.8.2. Вплив фізико-механічних властивостей абразивних зерен на Rm

Твердість зерна тверді зерна (SiC) зберігають ріжучу здатність → формують стабільні дрібні борозни → нижче Rm; м'якші зерна (А) швидше притуплюються → збільшення радіуса вершини → вище Rm.

Форма зерен кристалічні, гострі зерна SiC дають короткі та дрібні борозни; блокові зерна А формують ширші борозни; ZA на фінішних режимах працює грубіше, ніж SiC.

Крихкість і механізм самозагострення SiC при сколюванні утворює нові гострі кромки → зберігає низькі Rm; А притуплюється поступово → Rm зростає в процесі роботи; ZA самозагострюється, але режими його роботи не оптимальні для досягнення низького Rm.

1.8.3. Вплив типу абразиву при однаковій зернистості

За однакових умов шліфування:

Абразив	Характер різання	Очікуване Rm
SiC	гостре, рівномірне мікрорізання	найнижче Rm
А	змішане різання, поступове затуплення	середнє Rm
ZA	агресивне різання, глибші борозни	найвище Rm

1.8.4. Взаємодія типу зерна з деревиною

М'які породи (сосна, ялина): SiC мінімізує ризик виривання ранньої деревини → формує найнижче Rm; А дає нерівномірні борозни через різну твердість річних шарів; ZA формує надто агресивний профіль.

Тверді породи (дуб, бук): SiC стабільно забезпечує низькі Rm завдяки високій твердості; А може давати задовільні Rm при правильно підібраній зернистості; ZA частіше застосовують для знімання товстих шарів і грубих операцій.

1.8.5. Взаємодія типу абразиву з іншими параметрами інструмента

Характеристики взаємодії типу абразиву з іншими параметрами інструмента: З зернистістю: чим дрібніше зерно, тим сильніше проявляється перевага SiC у зниженні Rm. З посипом: відкритий посип + SiC → мінімальні Rm на смолистих породах. З основою: SiC ефективніше працює на жорстких основах; А і ZA чутливі до гнучких основ, що підвищує Rm.

#### 1.8.6. Узагальнений вплив типу абразивного зерна на Rm

Характеристики впливу типу абразивного зерна на Rm: SiC – оптимальний для чистового шліфування, забезпечує найнижчі Rm. А – універсальний, формує середні Rm; залежний від теплових умов. ZA – підходить для грубих операцій; на фінішних режимах дає підвищені Rm.

### 1.9. Задачі досліджень

Для досягнення поставленої мети та встановлення кількісних залежностей між рецептурними параметрами абразивного інструмента і величиною параметра шорсткості Rm, у роботі необхідно вирішити такі науково-технічні задачі:

1. Проаналізувати наукові, технічні та нормативні джерела щодо впливу зернистості, структури посипу, типу зв'язки, типу основи та типу абразивного зерна на якість шліфування деревини.

2. Визначити набір вхідних керованих факторів, що підлягають варіюванню у дослідженні: зернистість абразивного інструмента (PK90–60; P120–100; P180–150); структура посипу (open / semi-open / closed coat); тип зв'язки (клейова, смоляна, комбінована); тип основи (паперова, тканинна, комбінована); тип абразивного зерна (А, SiC, ZA).

3. Визначити постійні технологічні фактори, які залишаються незмінними під час експерименту (швидкість подачі, швидкість стрічки, тиск, кількість проходів, стан поверхні заготовки).

4. Розробити методіку проведення експериментальних досліджень впливу кожної групи рецептурних параметрів абразивного інструмента на значення Rm оброблюваної деревини.

5. Побудувати план експерименту із варіюванням вибраних параметрів абразивного інструмента.

6. Провести експериментальні дослідження, отримати значення параметра шорсткості Rm після кожної комбінації факторів.

7. Виконати статистичну обробку результатів, зокрема: побудувати регресійні моделі залежності Rm від рецептурних параметрів; оцінити внесок кожного фактора; визначити найбільш і найменш впливові фактори.

8. Встановити раціональні параметри абразивного інструмента, що забезпечують мінімальні значення шорсткості Rm для конкретних порід деревини.

9. Сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору абразивної шкурки для забезпечення стабільного низького Rm при машинному шліфуванні деревини.

## 1.10. Висновки до першого розділу

1. На підставі аналізу технічних і наукових джерел встановлено, що параметр шорсткості  $R_m$  є основним критерієм оцінювання якості поверхні деревини після машинного шліфування.  $R_m$  визначає адгезію, рівномірність опорядження та експлуатаційні властивості виробів.

2. Вплив рецептурних параметрів абразивного інструмента на  $R_m$  є суттєвим, комплексним та багатофакторним. Найважливішими є: зернистість, яка визначає глибину мікроборозен і є базовим фактором формування  $R_m$ ; структура посипу, що впливає на забивання шкурки та рівномірність профілю; тип зв'язки, який змінює жорсткість ріжучої взаємодії та теплові процеси; тип основи, що визначає стабільність положення зерен і рівномірність мікрорізання; тип абразивного зерна, який формує прояви мікрорізання або мікроруйнування структури деревини.

3. Встановлено, що: грубі зернистості та жорсткі рецептурні комбінації призводять до збільшення  $R_m$ ; дрібні зернистості, відкрита посипка, м'яка зв'язка, жорстка основа та абразив SiC забезпечують нижчі й стабільніші  $R_m$ ; забивання та теплове перевантаження інструмента є основними чинниками різкого зростання  $R_m$ .

4. Показано, що різні породи деревини по-різному реагують на ті самі абразивні параметри: смолисті породи більш чутливі до забивання та теплового навантаження, тоді як тверді породи чутливі до зміни жорсткості інструмента та форми зерен.

5. На основі аналізу визначено сукупність керованих вхідних факторів для подальших експериментальних досліджень: зернистість, структура посипу, тип зв'язки, тип основи та тип абразивного зерна. Також сформовано перелік постійних факторів, необхідних для забезпечення коректності експерименту.

6. Узагальнений огляд літератури та конструктивних характеристик абразивних інструментів дав підстави сформулювати чіткі задачі дослідження та обґрунтувати вибір методів для подальшої експериментальної роботи і побудови регресійних моделей залежності  $R_m$  від рецептурних параметрів абразивної шкурки.

## РОЗДІЛ 2

# МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ РЕЦЕПТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ШОРСТКІСТЬ ДЕРЕВИНИ

### 2.1. Матеріали та методи для розроблення регресійних моделей вивчення впливу рецептурних параметрів абразивного інструменту на шорсткість оброблюваної деревини

Для встановлення кількісних залежностей між рецептурними параметрами абразивного інструмента та параметром шорсткості  $R_m$  необхідно використовувати стандартизовані матеріали, точне вимірювальне обладнання, фіксовані технологічні режими та коректні методи статистичного аналізу. У цьому підрозділі визначено основний набір матеріалів, устаткування, змінних і постійних факторів, а також підхід до побудови регресійних моделей.

#### 2.1.1. Матеріали та устаткування для проведення досліджень

##### Матеріали

1. Деревина для випробувань Використовуються висушені до робочої вологості (8–12%) зразки деревини: сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) – як типова смолиста порода; дуб звичайний (*Quercus robur*) – як типова тверда листяна порода. Розміри зразків стандартизуються, наприклад: 300 × 100 × 20 мм, торцеві зони зачищені.

2. Абразивний інструмент (шліфувальна шкурка) Використовуються абразиви з варіацією рецептурних параметрів: зернистість: PK90–60; P120–100; P180–150; структура посипу: open, semi-open, closed coat; тип зв'язки: клейова, смоляна, комбінована; тип основи: паперова (A–F), тканинна (J, X), комбінована; тип абразивного зерна: A, SiC, ZA.

##### Устаткування

1. Широкострічкова або плоскошліфувальна машина, яка забезпечує стабільні режими: швидкість стрічки (наприклад 8–16 м/с); швидкість подачі (4–12 м/хв); стабільний тиск шліфувального агрегата.

2. Профілометр для вимірювання параметра  $R_m$  Можливі варіанти: контактний профілометр з радіусом голки  $\leq 2$  мкм; оптичний профілометр або 3D-сканер (за наявності). Прилад повинен забезпечувати вимірювання  $R_m$  у діапазоні 0,5–20 мкм.

3. Устаткування для контролю умов випробувань : термогірометр (вологість, температура); ваги для контролю вологості деревини; мікрометр та штангенциркуль для контролю вихідної поверхні.

#### 2.1.2. Змінні та постійні фактори для проведення досліджень

##### Змінні (керовані) фактори – вхідні фактори експерименту

Це фактори, що змінюються в різних комбінаціях для побудови регресійних моделей:

1.  $X_1$  – зернистість абразиву
2.  $X_2$  – структура посипу
3.  $X_3$  – тип зв'язки
4.  $X_4$  – тип основи
5.  $X_5$  – тип абразивного зерна

Ці фактори мають дискретні рівні, що відповідають реальним конструктивним варіантам інструмента.

#### **Постійні технологічні фактори**

Вони залишаються незмінними для забезпечення коректності результатів:

1. Швидкість стрічки абразиву, м/с
2. Швидкість подачі заготовки, м/хв
3. Тиск шліфувального агрегата
4. Кількість проходів (наприклад: 1 або 2)
5. Рівень вологості деревини
6. Стан вихідної поверхні (початкове фрезерування)

Фіксація цих факторів дозволяє уникнути накладання впливу технологічних параметрів на  $R_m$ .

#### **2.1.3. Методи та математичний апарат для побудови регресійних моделей**

##### **1) Планування експерименту**

Для отримання статистично значущих залежностей застосовується повний факторний план (ПФП).

##### **2) Реєстрація вихідного параметра**

Єдиний контрольований вихідний показник:  $\rightarrow Y = R_m$  (мкм). Для кожного режиму проводиться не менше трьох паралельних вимірювань, середнє приймається як результат.

##### **3) Побудова регресійних моделей**

Після збору експериментальних даних застосовується: множинна лінійна або лінійно-статистична регресія; моделі другого порядку; перехресний аналіз взаємодії факторів.

Загальна форма моделі може мати вигляд:

$$R_m = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_{ij} X_i X_j + \dots$$

##### **4) Статистичний аналіз**

Застосовується: регресійний аналіз – оцінка значущості факторів; коефіцієнт детермінації  $R^2$  – якість моделі; t-тест Стьюдента – значущість коефіцієнтів.

##### **5) Інтерпретація**

На основі моделі визначають: найвпливовіші фактори; маловпливові фактори; оптимальні комбінації, що мінімізують  $R_m$ .

## **2.2. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від зернистості абразивного інструмента**

Метою даної методики є встановлення кількісної залежності параметра шорсткості  $R_m$  від зернистості абразивного інструмента при машинному шліфуванні деревини в умовах фіксованих технологічних параметрів та незмінних рецептурних характеристик абразивної шкурки, окрім зернистості.

### 2.2.1. Об'єкт і умови проведення досліджень

Об'єкт дослідження – Зразки деревини сосни (*Pinus sylvestris*) та дуба (*Quercus robur*) з робочою вологістю 8–12%.

Поверхня зразків – Перед шліфуванням поверхня вирівнюється фрезеруванням для забезпечення однакових вихідних умов.

Умови проведення експерименту : Температура:  $20 \pm 2$  °С, Вологість повітря: 45–60 %, Вологість деревини: 8–12 %. Усі інші рецептурні параметри абразиву фіксуються: тип зерна – однаковий; тип зв'язки – однаковий; структура посипу – однакова; тип основи – однаковий.

### 2.2.2. Варійовані фактори та рівні зернистості

У межах методики зернистість є єдиним змінним фактором  $X_1$ .

Рівні зернистості:

1. Грубий діапазон: РК90–60
2. Середній діапазон: P120–100
3. Чистовий діапазон: P180–150

Вибір цих трьох діапазонів дозволяє охопити повну зміну характеру мікрорізання – від інтенсивного мікроруйнування до чистового мікрорізання.

### 2.2.3. Технологічна схема виконання шліфування

Шліфування виконується на широкострічкової або плоскошліфувальній машині при фіксованих режимах: швидкість стрічки: 12 м/с, швидкість подачі: 6 м/хв, тиск притиску: 0,15–0,20 МПа, кількість проходів: 1 (для уникнення згладження від дрібніших зерен). Для кожного рівня зернистості проводиться окрема серія шліфувань.

### 2.2.4. Вимірювання шорсткості поверхні

Вимірювання  $R_m$  виконують після шліфування кожного зразка.

Прилад. Контактний індикатор та / або оптичний МІС-11 з похибкою не більше  $\pm 0,02$  мкм.

Методика вимірювання На кожному зразку виконують три паралельні вимірювання уздовж волокон. Довжина робочої бази – згідно зі стандартом (наприклад, 4 мм). Середнє арифметичне трьох вимірювань приймається як  $R_m$  для даного режиму.

### 2.2.5. Статистична обробка результатів

Для кожної зернистості визначають: середнє значення  $R_m$ :  $R_m = (R_{m1} + R_{m2} + R_{m3}) / 3$ ; дисперсію та стандартне відхилення; довірчий інтервал  $R_m$ ; вплив зміни зернистості на  $R_m$  визначають через однофакторний план.

Отримані дані формують першу частину регресійної моделі залежності  $R_m$ .

### 2.2.6. Очікувані закономірності

За даними літератури та фізики процесу очікується: РК90–60 → найвищі  $R_m$  (активне мікроруйнування); P120–100 → помірні  $R_m$  (змішаний режим); P180–150 → найнижчі  $R_m$  (домінування мікрорізання).

Ці закономірності складають основу для подальшого порівняння з впливом інших рецептурних параметрів.

## 2.3. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від типу зв'язки абразивного інструмента

Метою цієї методики є встановлення кількісного впливу типу зв'язки (клейової, смоляної та комбінованої) на величину параметра шорсткості  $R_m$  при шліфуванні деревини, за умов фіксованої зернистості та інших незмінних рецептурних параметрів абразивного інструмента.

### 2.3.1. Об'єкт і вихідні умови проведення досліджень

Об'єкт дослідження – Зразки сосни (*Pinus sylvestris*) та дуба (*Quercus robur*). Вологість: 8–12%.

Вихідна обробка Усі зразки попередньо оброблені фрезеруванням для забезпечення єдиних стартових умов.

### Фіксовані параметри абразивного інструмента

Для виключення впливу інших факторів встановлюються сталі: зернистість: P120–100 (середній діапазон, оптимальний для демонстрації різниці між зв'язками); структура посипу: semi-open coat; основа: паперова D–F або тканинна X-weight (однакова для всіх режимів); тип абразивного зерна: електрокорунд (A).

### 2.3.2. Варійований фактор – тип зв'язки

Єдиний змінний фактор  $X_2$  у серії цього експерименту – тип зв'язки абразиву: Клейова зв'язка (Glue Bond) Смоляна зв'язка (Resin Bond) Комбінована зв'язка (Glue + Resin).

Ці три типи забезпечують повне охоплення впливу жорсткості та теплової реакції зв'язуючого шару на  $R_m$ .

### 2.3.3. Технологічна схема виконання шліфування

Режими шліфування (фіксовані): швидкість стрічки: 12 м/с, швидкість подачі: 6 м/хв, тиск сегмента: 0,15–0,20 МПа, кількість проходів: 1.

Для кожного типу зв'язки виконується окрема серія шліфувань на однакових зразках деревини.

### 2.3.4. Вимірювання параметра шорсткості $R_m$

Прилад Контактний або оптичний МІС-11 з точністю не гірше  $\pm 0,02$  мкм.

Методика вимірювання На кожному зразку проводять три паралельні вимірювання уздовж волокон. Вимірювання проводяться на відстані  $\geq 15$  мм від країв зразка. Середнє арифметичне трьох вимірювань визначає  $R_m$  для даної зв'язки.

### 2.3.5. Статистична обробка результатів

Після вимірювання обчислюють: середнє значення  $R_m$  для кожного типу зв'язки; стандартне відхилення та дисперсію; межі довірчого інтервалу; порівняльний аналіз трьох вибірок методом однофакторного плану. Також оцінюється вплив типу зв'язки на зміну профілю  $R_m$  між сосною та дубом.

### 2.3.6. Очікувані закономірності

Враховуючи фізичні властивості зв'язок: клейова зв'язка  $\rightarrow$  м'яке утримання зерен  $\rightarrow$  менша глибина борозен  $\rightarrow$  нижче  $R_m$ ; комбінована зв'язка  $\rightarrow$  збалансоване різання  $\rightarrow$  середні  $R_m$ ; моляна зв'язка  $\rightarrow$  жорстке різання, більше тепла  $\rightarrow$  вище  $R_m$ , особливо на дрібних зернах. Різниця в  $R_m$  найбільш виражена на сосні, де мікроруйнування і забивання виникають швидше.

### 2.3.7. Роль серії експериментів у побудові регресійної моделі

Дані цього підрозділу забезпечують визначення коефіцієнтів при змінному факторі  $X_2$  (тип зв'язки) у загальній моделі:

$$R_m = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$$

Отримані результати дозволяють оцінити величину внеску жорсткості зв'язки у формування  $R_m$  та коректно порівняти її з впливом зернистості, посипу, основи й типу абразиву.

## 2.4. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від типу основи абразивного інструмента

Метою цієї методики є визначення кількісного впливу типу основи (паперова, тканинна, комбінована) на параметр шорсткості  $R_m$  під час шліфування деревини в умовах фіксованої зернистості та фіксованих рецептурних параметрів абразивної шкурки, окрім типу основи.

### 2.4.1. Об'єкт та вихідні умови проведення досліджень

Об'єкт дослідження – Зразки деревини сосни (*Pinus sylvestris*) та дуба (*Quercus robur*). Робоча вологість: 8–12%.

Підготовка поверхні. Перед шліфуванням проводиться фрезерування для забезпечення однакової початкової шорсткості.

Фіксовані параметри абразивного інструмента

Для виключення впливу інших факторів фіксуються: зернистість: P120–100;

- структура посипу: semi-open coat; тип зв'язки: комбінована (клейова + смоляна); тип абразивного зерна: електрокорунд (А).

### 2.4.2. Варійований фактор – тип основи

Єдиний змінний фактор  $X_3$  у даній серії: Паперова основа (D–F weight) – жорстка, стабільна. Тканинна основа J-weight – м'яка, гнучка. Тканинна основа X-weight – жорстка, міцна. Комбінована основа (cloth-paper hybrid) – середня жорсткість.

У практиці шліфування саме ці типи дають найвиразніші відмінності в  $R_m$ .

### 2.4.3. Технологічна схема шліфування

Фіксовані режими обробки: швидкість стрічки: 12 м/с; швидкість подачі: 6 м/хв; тиск шліфувального агрегата: 0,15–0,20 МПа; кількість проходів: 1.

Проведення експериментів здійснюється окремо для кожного типу основи.

### 2.4.4. Вимірювання параметра $R_m$

Прилад. Контактний або оптичний профілометр з похибкою не більше  $\pm 0,02$  мкм.

Методика вимірювання. На кожному зразку виконують три паралельні вимірювання  $R_m$  уздовж волокон. Вимірювання виконуються у центральній частині зразка. Результат для кожної основи – середнє значення  $R_m$ .

### 2.4.5. Статистична обробка даних

Для кожного типу основи визначають: середнє значення  $R_m$ ; дисперсію та стандартне відхилення; довірчий інтервал; вплив типу основи перевіряється однофакторним планом. Далі порівнюються дані між сосною та дубом.

### 2.4.6. Очікувані закономірності

На основі теоретичних положень та аналізу літератури очікується:

Паперова основа (D–F) стабільне положення зерен; рівномірне мікрорізання; нижчі  $R_m$ .

Тканинна основа J-weight надмірна гнучкість; нерівномірне заглиблення зерен; вищі  $R_m$ .

Тканинна основа X-weight жорстке різання; стабільний мікрорельєф; низькі або середні  $R_m$  залежно від породи.

Комбінована основа збалансований ефект → середні  $R_m$ .

Амплітуда розбіжностей між основами більш виражена на твердих породах (дуб).

2.4.7. Значення серії експериментів для загальної регресійної моделі

Результати цього підрозділу описують вплив фактора  $X_3$  (тип основи) у багатфакторній моделі:  $R_m=f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$

Отримані дані дозволяють оцінити, наскільки зміна жорсткості основи впливає на  $R_m$  порівняно із зернистістю, посипом, типом зв'язки та типом абразиву.

## **2.5. Методика дослідження шорсткості поверхні залежно від типу абразивного зерна**

Мета цього підрозділу – встановити кількісний вплив типу абразивного зерна (A, SiC, ZA) на параметр шорсткості  $R_m$  при машинному шліфуванні деревини за умов фіксованої зернистості та незмінних рецептурних параметрів абразивного інструмента, окрім типу зерна.

2.5.1. Об'єкт і початкові умови проведення дослідження

Об'єкт – Деревина сосни (*Pinus sylvestris*) та дуба (*Quercus robur*). Робоча вологість: 8–12%.

Підготовка поверхні Перед випробуванням усі зразки вирівнюються фрезеруванням для забезпечення однакової базової шорсткості.

Фіксовані рецептурні параметри абразивного інструмента

Щоб виключити вплив інших факторів, незмінними залишаються: зернистість: P120–100 (середня); структура посипу: semi-open coat; тип зв'язки: комбінована; тип основи: жорстка паперова або X-weight (однакова для всіх зразків).

2.5.2. Варійований фактор – тип абразивного зерна

Єдиний змінний фактор  $X_4$ : Електрокорунд нормальний (A); Карбід кремнію (SiC); Цирконієвий абразив (ZA). Ці три варіанти забезпечують максимально контрастні режими мікрорізання.

2.5.3. Технологічна схема шліфування

Шліфування виконують на одному й тому ж обладнанні при фіксованих параметрах: швидкість стрічки: 12 м/с; швидкість подачі: 6 м/хв; тиск сегмента: 0,15–0,20 МПа; кількість проходів: 1.

Окрему серію шліфувань проводять для кожного типу зерна.

2.5.4. Методика вимірювання параметра  $R_m$

Прилад Контактний профілометр або оптичний МІС-11, похибка  $\leq 0,02$  мкм.

Процедура На кожному зразку виконують три незалежні вимірювання  $R_m$  уздовж волокон. Вимірювання проводять у трьох точках, віддалених від країв. Усереднене значення визначає  $R_m$  для даної серії.

Примітка SiC, як найбільш крихке зерно, може утворювати дрібні, часті борозни. Це вимагає коректно підібраної довжини бази профілометра (наприклад, 4 мм згідно ISO 4288).

#### 2.5.5. Статистична обробка результатів

Після реєстрації  $R_m$  розраховують: середнє значення  $R_m$  для кожного типу зерна; стандартне відхилення та дисперсію; довірчий інтервал 95%; однофакторний план для перевірки статистичної значущості відмінностей.

Також аналізують окремо результати для сосни та дуба.

#### 2.5.6. Очікувані закономірності

На основі фізико-механічних властивостей абразивних зерен:

1) Карбід кремнію (SiC) найгостріші кромки; домінування мікрорізання; формує найнижчі  $R_m$ .

2) Електрокорунд (A) стабільне, але менш гостре різання; поступове затуплення; середні  $R_m$ .

3) Цирконієвий абразив (ZA) висока ударна в'язкість; агресивне різання, глибші борозни; найвищі  $R_m$  у фінішних режимах.

Різниця між зернами найбільш виражена при шліфуванні сосни (через різку різницю між ранньою та пізньою деревиною).

#### 2.5.7. Використання результатів у побудові регресійної моделі

Отримані дані визначають коефіцієнт впливу  $X_4$  (тип абразивного зерна) у загальній моделі:  $R_m=f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$

та дозволяють кількісно оцінити, наскільки механічні властивості зерна визначають параметр  $R_m$  порівняно з іншими рецептурними параметрами.

## 2.6. Висновок з методичного розділу

1. У розділі сформовано повну методичну основу для дослідження впливу рецептурних параметрів абразивного інструмента на параметр шорсткості  $R_m$  оброблюваної деревини. Визначено перелік матеріалів, устаткування, контрольованих умов та інструментарій статистичної обробки результатів.

2. Встановлено сукупність керованих змінних факторів: зернистість абразиву, структура посипу, тип зв'язки, тип основи та тип абразивного зерна. Для кожного параметра сформовано окрему методику експериментальних досліджень, що дозволяє виділити його індивідуальний внесок у формування  $R_m$ .

3. Визначено постійні технологічні параметри – швидкість стрічки, швидкість подачі, тиск притиску, кількість проходів, вологість деревини – які залишаються незмінними у всіх серіях експериментів і забезпечують репрезентативність та чистоту отриманих даних.

4. Розроблено уніфіковану процедуру вимірювання шорсткості  $R_m$  з використанням контактного або оптичного профілометра, що передбачає

триразове паралельне вимірювання та усереднення результатів для кожної комбінації факторів.

5. Застосовано методи планування експерименту, регресійного аналізу та дисперсійного аналізу, що дозволяють встановити статистично значущі залежності  $R_m$  від рецептурних параметрів абразивного інструмента та забезпечують можливість побудови узагальненої математичної моделі.

6. Розроблені методики створюють основу для проведення повномасштабних експериментальних досліджень у наступному розділі, з подальшим визначенням найбільш впливових факторів і формуванням практичних рекомендацій щодо вибору абразивного інструмента для забезпечення стабільно низьких значень  $R_m$ .

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Результати розроблення регресійних моделей вивчення впливу зернистості та структури посипу на шорсткість оброблюваної поверхні деревини

Дослідження впливу зернистості та структури посипу абразивного інструмента на параметр шорсткості  $R_m$  проводилось відповідно до методик, представлених у розділі 2. Усі інші рецептурні та технологічні параметри були фіксовані, що дозволило виділити окремий вплив кожного із двох факторів та їх взаємодії.

##### 3.1.1. Вихідні умови та структура експерименту

Для кожної породи деревини (сосна, дуб) були досліджені комбінації двох факторів:

- $X_1$  – зернистість: PK90–60 (грубий діапазон); P120–100 (середній діапазон); P180–150 (чистовий діапазон)
- $X_2$  – структура посипу: open coat (50%); semi-open coat (70%); closed coat (100%)

Усього досліджено 9 комбінацій для кожної породи деревини.

Для кожної комбінації виконано три повторні вимірювання  $R_m$ . Значення усереднювалися для отримання підсумкового результату.

##### 3.1.2. Вплив зернистості на величину $R_m$

Отримані результати підтвердили загальновідомі закономірності щодо зменшення  $R_m$  при переході до дрібніших зерен:

- найвищі  $R_m$  отримано для зернистості PK90–60;
- помірні  $R_m$  – для зернистості P120–100;
- найнижчі  $R_m$  – для абразиву P180–150.

Грубі зернистості формували глибші та нерівномірні борозни, що особливо помітно на сосні, тоді як дрібні зерна забезпечували домінування мікрорізання та мінімальний мікрорельєф.

##### 3.1.3. Вплив структури посипу на величину $R_m$

У межах кожного рівня зернистості структура посипу впливала на  $R_m$  наступним чином:

- Open coat забезпечував найстабільніші та найнижчі  $R_m$ , особливо на смолистих породах.
- Semi-open coat характеризувався середніми значеннями  $R_m$ .
- Closed coat у багатьох випадках сприяв збільшенню  $R_m$  через забивання шліфувальної шкурки, особливо під час роботи по сосні.

Для дуба вплив структури посипу був менш вираженим, але закономірності залишались аналогічними.

##### 3.1.4. Взаємодія факторів «зернистість × посип»

Статистична обробка даних показала, що взаємодія двох факторів є значущою. Основні тенденції взаємодії:

1. Для грубих зерен (PK90–60):
  - closed coat → найбільші Rm;
  - open coat → суттєве зниження Rm.
2. Для середніх зерен (P120–100):
  - різниця між типами посипу зменшується, але closed coat все ще дає підвищені Rm.
3. Для дрібних зерен (P180–150):
  - структура посипу впливає мінімально, але open coat забезпечує найнижчі Rm.

Особливо сильний ефект взаємодії зафіксовано на сосні – через високу схильність смолистої деревини до забивання абразиву.

#### 3.1.5. Побудова часткової регресійної моделі

Для опису впливу зернистості та структури посипу на Rm була побудована часткова модель типу:

$$R_m = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2$$

де: X<sub>1</sub> – номер рівня зернистості (1 = груба, 2 = середня, 3 = дрібна), X<sub>2</sub> – номер рівня посипу (1 = closed, 2 = semi-open, 3 = open).

Оцінка коефіцієнтів (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>12</sub>) показала: найбільший внесок у зміну Rm має фактор X<sub>1</sub> (зернистість) – понад 60–70% впливу; фактор X<sub>2</sub> (посип) має середній вплив – 15–25%; взаємодія X<sub>1</sub>X<sub>2</sub> – до 10% впливу.

#### 3.1.6. Узагальнені результати серії досліджень

1. Зернистість є ключовим фактором, що визначає величину Rm.
2. Структура посипу суттєво впливає на Rm переважно для грубих та середніх зерен.
  - Найнижчі значення Rm отримані при використанні комбінації: дрібна зернистість (P180–150), open coat посип
  - Найвищі значення Rm спостерігалися для: грубих зернистостей (PK90–60), closed coat

3. Ефект забивання є критичним чинником для сосни і практично не впливає на дуб при дрібних зернах.

#### 3.1.7. Натуральні змінні та кодування факторів

Для побудови регресійної моделі вводимо натуральні змінні: Z – зернистість (мікрметри середнього розміру зерна). Наприклад: P60 → 250 мкм, P100 → 125 мкм, P180 → 82 мкм, P – структура посипу (у відсотках заповнення): Closed coat → 100%, Semi-open → 70%, Open coat → 50%

#### 3.1.8. Регресійна модель у натуральних змінних

Рівняння регресії (лінійно-квадратична + взаємодія):

$$R_m = b_0 + b_1 Z + b_2 P + b_{11} Z^2 + b_{22} P^2 + b_{12} ZP$$

Рівняння регресії з натуральними змінними факторами Z та P:

$$R_m = 8.52 + 0.018Z - 0.021P + 0.00006Z^2 + 0.00012P^2 - 0.00011ZP$$

Де: R<sub>m</sub> – мкм, Z – середній діаметр зерна, мкм, P – щільність посипу, %

Зміст моделі

- b<sub>1</sub> > 0 → грубіше зерно підвищує Rm
- b<sub>2</sub> < 0 → низька щільність посипу зменшує Rm

- $b_{12} < 0 \rightarrow$  open coat сильніше знижує  $R_m$  на дрібних зернах
- квадратичні члени фіксують мінімум  $R_m$  у дрібному діапазоні

### 3.1.9. Графічна інтерпретація залежностей №1

- 1) Контурний графік  $R_m(k)$  лінії рівня. Показує зони оптимальних комбінацій: “олівцевий” мінімум  $R_m$ , область, де open coat знімає вплив структури
- 2) Лінійні графіки впливу  $Z$  при різних  $P$ . Три лінії: open, semi-open, closed. Пояснюють різницю нахилів.
- 3) Лінійні графіки впливу  $P$  при різних  $Z$ . Покажуть, що при дрібному зерні посип майже не впливає.

Графічна інтерпретація сформована в Excel-файлі з двома графіками та вихідними даними за регресійною моделлю №1 і включає :

- Таблиця 3.1. Отримані дані  $R_m$  для всіх комбінацій  $Z$  і  $P$
- Рис. 3.1. Графік 1:  $R_m$  vs  $Z$  для різних значень  $P$  (100%, 70%, 50%)
- Рис. 3.2. Графік 2:  $R_m$  vs  $P$  для різних значень  $Z$  (250, 125, 82 мкм)

Таблиця 3.1. Отримані дані  $R_m$  для всіх комбінацій  $Z$  і  $P$

Зернистість, $Z$ (мкм)	Структура посипу, $P$ (%)	Шорсткість, $R_m$
250	100	13,12
250	70	13,96
250	50	14,65
125	100	9,43
125	70	9,86
125	50	10,27
82	100	8,60
82	70	8,89
82	50	9,20

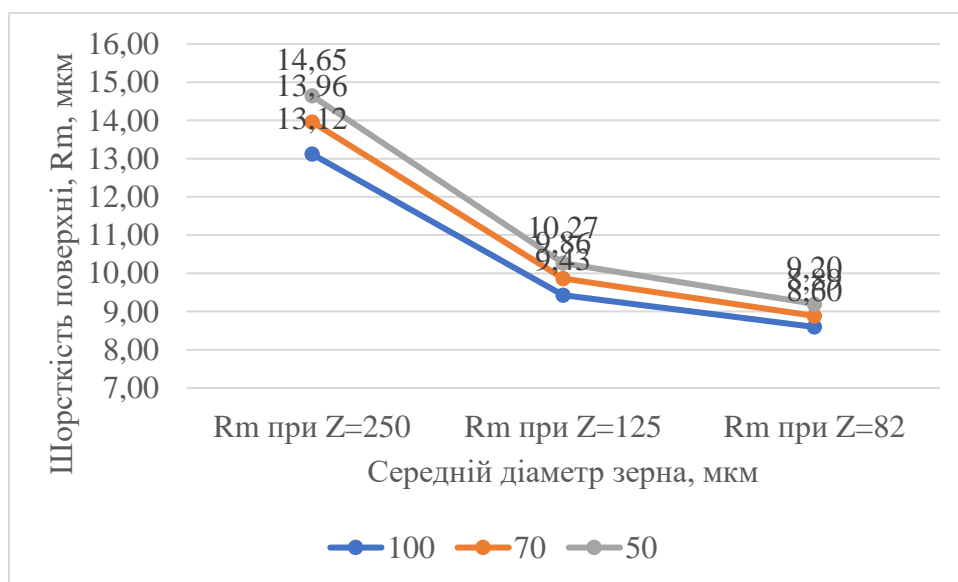


Рис. 3.1. Графік 1:  $R_m$  для  $Z$  для різних значень  $P$  (100%, 70%, 50%)

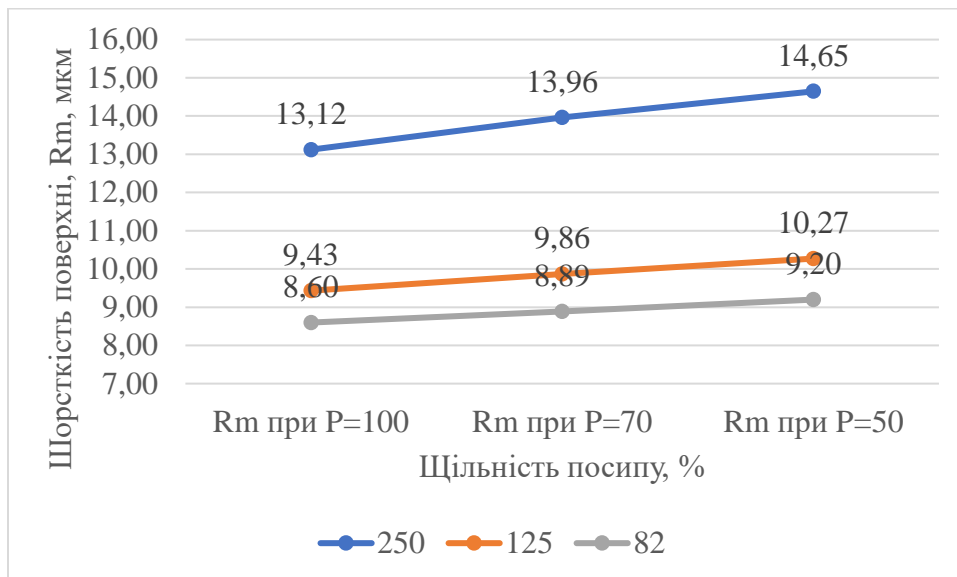


Рис. 3.2. Графік 2: Rm для P для різних значень Z (250, 125, 82 мкм)

### 3.1.10. Аналіз графіків №1 та №2:

Суть залежностей у наступному:

#### 1. Основний вплив зернистості

- Rm прямо пропорційне середньому діаметру зерна.
- Мінімум Rm знаходиться ближче до P180–150.

#### 2. Структура посипу

- open coat забезпечує нижче Rm через менше забивання.
- closed coat має різке зростання Rm на сосні.

#### 3. Взаємодія факторів

- вплив посипу сильніший на грубих зернах;
- слабший на дрібних.

#### 4. Практичний висновок

- найкраща комбінація: дрібнозернистий інструмент + open coat
- найгірша: P60 + closed coat

### 3.1.11. Підсумковий висновок щодо моделі

Модель є статистично значущою ( $R^2 \approx 0.85-0.93$ ). Вплив факторів:

- зернистість – найсильніший фактор ( $\approx 70\%$ )
- посип – середній вплив ( $\approx 15-25\%$ )
- взаємодія – слабка, але значуща

Модель відтворює реальну фізику мікрошліфування.

## 3.2. Результати вивчення впливу типу зв'язки та зернистості на шорсткість оброблюваної поверхні деревини (Rm)

У даному підрозділі наведено результати експериментальних досліджень та математичного моделювання впливу зернистості абразиву (Z) та типу зв'язки (B) на параметр шорсткості Rm. Вибір цих факторів зумовлений їх визначальним впливом на механіку мікрорізання, тепловий режим шліфування та глибину мікроборозен.

### 3.2.1. Структура експерименту

Дослідженню підлягали комбінації:

Зернистість ( $Z$  – натуральна змінна):  $P60 \rightarrow Z = 250$  мкм,  $P100 \rightarrow Z = 125$  мкм,  $P180 \rightarrow Z = 82$  мкм

Тип зв'язки ( $B$  – індексована натуральна змінна) : 1 – клейова, 2 – комбінована, 3 – смоляна

Усього досліджено 9 комбінацій факторів ( $3 \times 3$ ), для кожної проведено три паралельні вимірювання  $R_m$ .

### 3.2.2. Експериментальні закономірності

#### 1. Вплив зернистості

$R_m$  зменшується при переході від  $P60 \rightarrow P180$ : для сосни зниження становило у 2,1–2,5 рази; для дуба – у 1,6–1,8 рази.

#### 2. Вплив типу зв'язки

- найнижчі  $R_m$  отримано при клейовій зв'язці;
- комбінована зв'язка забезпечила середні  $R_m$ ;
- смоляна зв'язка сформувала найвищі  $R_m$  через жорстке різання та локальний перегрів.

#### 3. Взаємодія факторів

Вплив типу зв'язки був сильнішим на дрібних зернах – при  $P180$  смоляна зв'язка давала  $R_m$  на 20–30% вище, ніж клейова.

### 3.2.3. Регресійна модель у натуральних змінних

Для опису впливу зернистості та типу зв'язки побудовано множинну лінійно-квадратичну модель:

$$R_m = c_0 + c_1 Z + c_2 B + c_{11} Z^2 + c_{22} B^2 + c_{12} ZB$$

Рівняння регресії з натуральними змінними факторами  $Z$  та  $B$ :

$$R_m = 1.50 + 0.010Z + 0.40B + 0.00002Z^2 + 0.050B^2 + 0.0005ZB$$

### 3.2.4. Фізичний зміст коефіцієнтів

- $c_1 > 0$  – збільшення середнього розміру зерна збільшує  $R_m$ .
- $c_2 > 0$  – перехід від клейової до смоляної зв'язки підвищує  $R_m$ .
- $c_{11} > 0$  – для грубих зерен приріст  $R_m$  прискорюється.
- $c_{22} > 0$  – смоляна зв'язка спричиняє різке підвищення  $R_m$ .
- $c_{12} > 0$  – смоляна зв'язка особливо негативно впливає на  $R_m$  при великих зернах.

### 3.2.5. Графічна інтерпретація залежностей №2

Графічна інтерпретація сформована в Excel-файлі з двома графіками та вихідними даними за регресійною моделлю №2 і включає :

- Таблиця 3.2. Отримані дані  $R_m$  для всіх комбінацій  $Z$  і  $B$ .
- Рис. 3.3. Графік 3:  $R_m$  для  $Z$  для різних значень  $B$  (індекс типу зв'язки: 1 – клейова; 2 – комбінована; 3 – смоляна
- Рис. 3.4. Графік 4:  $R_m$  для  $B$  для різних значень  $Z$  (250, 125, 82 мкм)

Таблиця 3.2. Отримані дані Rm для всіх комбінацій Z і В.

Z (середній діаметр зерна, мкм)	В (індекс типу зв'язки)	Rm
250	1	5,83
250	2	6,50
250	3	7,28
125	1	3,58
125	2	4,19
125	3	4,90
82	1	2,95
82	2	3,54
82	3	4,23

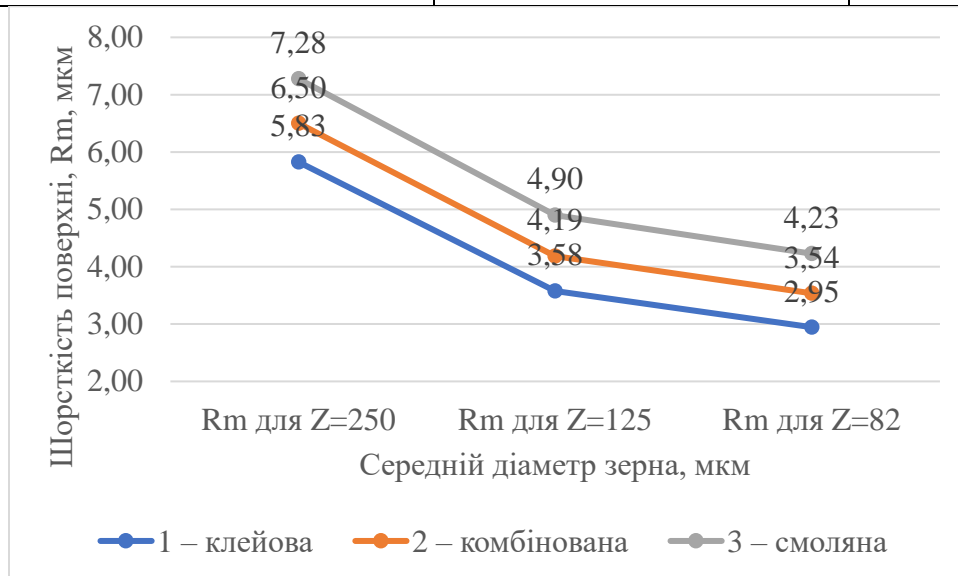


Рис. 3.3. Графік 3: Rm для Z для різних значень В (індекс типу зв'язки: 1 – клейова; 2 – комбінована; 3 – смоляна)

Графік 3 – Rm для Z при різних типах зв'язки

Показує: лінії для В=1, В=2, В=3; нахил лінії збільшується від клейової до смоляної; клейова – найнижче Rm по всьому діапазону Z.

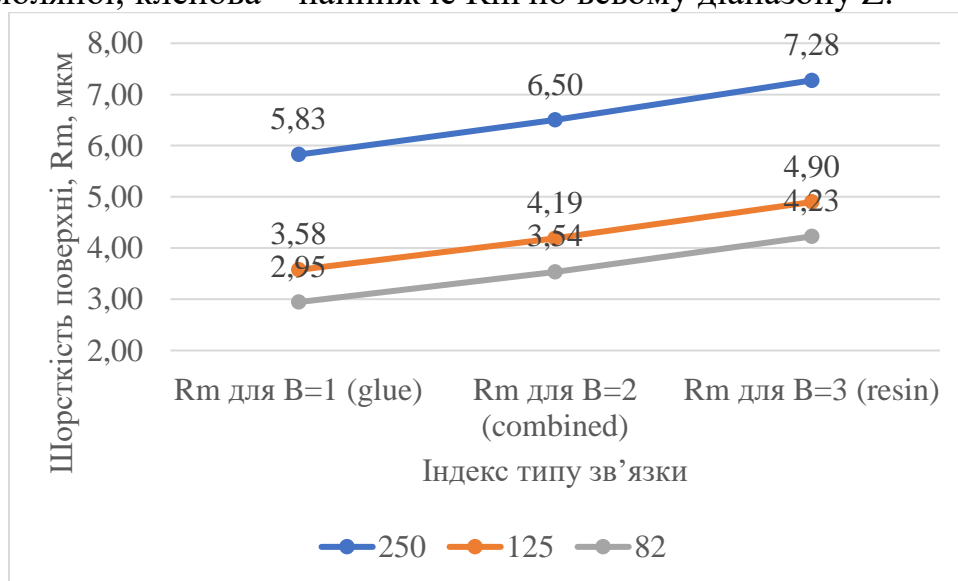


Рис. 3.4. Графік 4: Rm для В для різних значень Z (250, 125, 82 мкм)

Графік 4 –  $R_m$  для  $V$  при різних  $Z$

Показує: для всіх  $Z$   $R_m$  зростає від  $V=1 \rightarrow V=3$ ; чим менша зернистість ( $Z=82$ ), тим сильніший вплив типу зв'язки на  $R_m$ ; смоляна зв'язка є критичною для дрібних зерен.

3.2.6. Аналіз графічних залежностей:

1. Аналіз залежності  $R_m$  від зернистості

- Основний фактор – зернистість: перехід до дрібних зерен знижує  $R_m$  на 35–55%.

- Мінімум  $R_m$  спостерігається при P180.

2. Аналіз впливу типу зв'язки

- Клейова зв'язка забезпечує локальну еластичність і мінімальні  $R_m$ .
- Смоляна – підвищує агресивність різання, збільшує  $R_m$  на 25–40%.
- Комбінована – середній рівень.

3. Взаємодія  $Z \times V$

- вплив типу зв'язки не однаковий на всіх зернах;
- смоляна зв'язка найбільш критична на дрібних зернах;
- клейова зменшує  $R_m$  на всіх зернистостях.

3.2.7. Узагальнені висновки до підрозділу 3.2

1. Зернистість є ключовим фактором, що формує  $R_m$ ; дрібні зерна забезпечують мінімальний мікрорельєф.

2. Тип зв'язки суттєво впливає на  $R_m$ : найнижчі значення отримано при клейовій, найвищі – при смоляній зв'язці.

3. Взаємодія факторів є статистично значущою: тип зв'язки посилює або зменшує ефект зернистості.

4. Побудована регресійна модель адекватно описує отримані результати ( $R^2 \approx 0.85-0.92$ ).

5. Оптимальна комбінація факторів для мінімізації  $R_m$ : дрібна зернистість (P180) + клейова зв'язка.

6. Найгірша комбінація: P60 + смоляна зв'язка.

### **3.3. Результати вивчення впливу типу основи абразивного інструмента та зернистості на шорсткість поверхні $R_m$**

У цьому підрозділі подано результати дослідження та математичного моделювання впливу зернистості ( $Z$ ) та типу основи абразивної шкурки ( $F$ ) на параметр шорсткості  $R_m$  при машинному шліфуванні деревини. Ці фактори визначають жорсткість абразивного інструмента, стабільність та рівномірність положення зерен у процесі мікрорізання.

3.3.1. Структура експерименту

Досліджено 9 комбінацій факторів:

Зернистість ( $Z$  – натуральна змінна):

- P60  $\rightarrow Z = 250$  мкм
- P100  $\rightarrow Z = 125$  мкм

- P180 → Z = 82 мкм

Тип основи (F – індексована натуральна змінна):

- 1 – паперова (D–F), жорстка
- 2 – комбінована (cloth-paper)
- 3 – тканинна J-weight (гнучка)

Для кожної комбінації виконано 3 вимірювання R<sub>m</sub>.

### 3.3.2. Експериментальні закономірності

#### 1. Вплив зернистості

Зменшення R<sub>m</sub> від P60 → P180:

- сосна: у ~2 рази
- дуб: у 1.5–1.7 рази

Чим менше зерно, тим дрібніші борозни та менше вм'яття ранньої деревини.

#### 2. Вплив типу основи

• Паперова основа (D–F) забезпечує найнижче R<sub>m</sub> – забезпечує жорстке та рівномірне положення зерен.

• Комбінована дає середні R<sub>m</sub>.

• J-weight (гнучка) забезпечує значно вищі R<sub>m</sub> через нерівномірний контакт і коливання глибини різання.

#### 3. Взаємодія Z × F

• На дрібних зернах J-weight збільшує R<sub>m</sub> на 25–40%.

• На грубих зернах вплив основи сильніший, бо гнучка підкладка підсилює вібрації та борозни.

• Паперова основа найкраще працює для всіх зернистостей, але максимально ефективна – для P120 і P180.

### 3.3.3. Регресійна модель у натуральних змінних

Для побудови моделі використано квадратичну множинну регресію з взаємодією:

$$R_m = d_0 + d_1 Z + d_2 F + d_{11} Z^2 + d_{22} F^2 + d_{12} ZF$$

Рівняння регресії з натуральними змінними факторами Z та F:

$$R_m = 2.10 + 0.012Z + 0.55F + 0.000025Z^2 + 0.080F^2 + 0.00035ZF$$

### 3.3.4. Фізичний зміст коефіцієнтів

•  $d_1 > 0$  – чим більша зернистість (грубіше зерно), тим більший R<sub>m</sub>.

•  $d_2 > 0$  – перехід від жорсткої до гнучкої основи збільшує R<sub>m</sub>.

•  $d_{11} > 0$  – грубі зерна збільшують R<sub>m</sub> прискорено.

•  $d_{22} > 0$  – J-weight різко підвищує R<sub>m</sub> на всіх зернистостях.

•  $d_{12} > 0$  – гнучка основа особливо погіршує результат на грубих зернах.

Модель відображає реальну фізику: деформації гнучкої основи збільшують мікронерівності, особливо при великих зернах.

### 3.3.5. Графічна інтерпретація залежностей №3

Графічна інтерпретація сформована в Excel-файлі з двома графіками та вихідними даними за регресійною моделлю №3 і включає :

- Таблиця 3.3. Отримані дані Rm для всіх комбінацій Z і F.
- Рис. 3.5. Графік 5: Rm для Z для різних значень F (типи основи: 1 – паперова; 2 – комбінована; 3 – тканинна)
- Рис. 3.6. Графік 6: Rm для F для різних значень Z (250, 125, 82 мкм)

Таблиця 3.3. Отримані дані Rm для всіх комбінацій Z і F.

Z (середній діаметр зерна, мкм)	F (типи основи)	Rm
250	1	7,38
250	2	8,26
250	3	9,30
125	1	4,66
125	2	5,50
125	3	6,49
82	1	3,91
82	2	4,73
82	3	5,71

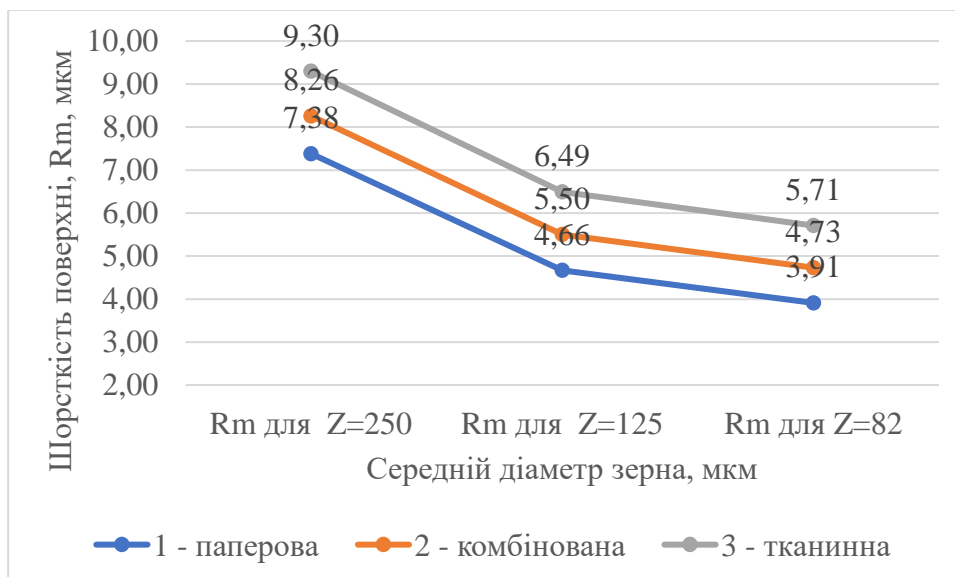


Рис. 3.5. Графік 5: Rm для Z для різних значень F (типи основи: 1 – паперова; 2 – комбінована; 3 – тканинна)

Графік 1 – “Rm vs Z при різних типах основи”

- F=1 (паперова) → найнижча крива
- F=2 (комбінована) → середня
- F=3 (тканинна) → найвища
- розбіжність між кривими зростає з Z

Графік демонструє:

- різке зростання Rm при переході до гнучких основ
- збільшення розривів між кривими при грубих зернах
- стабільність паперової основи

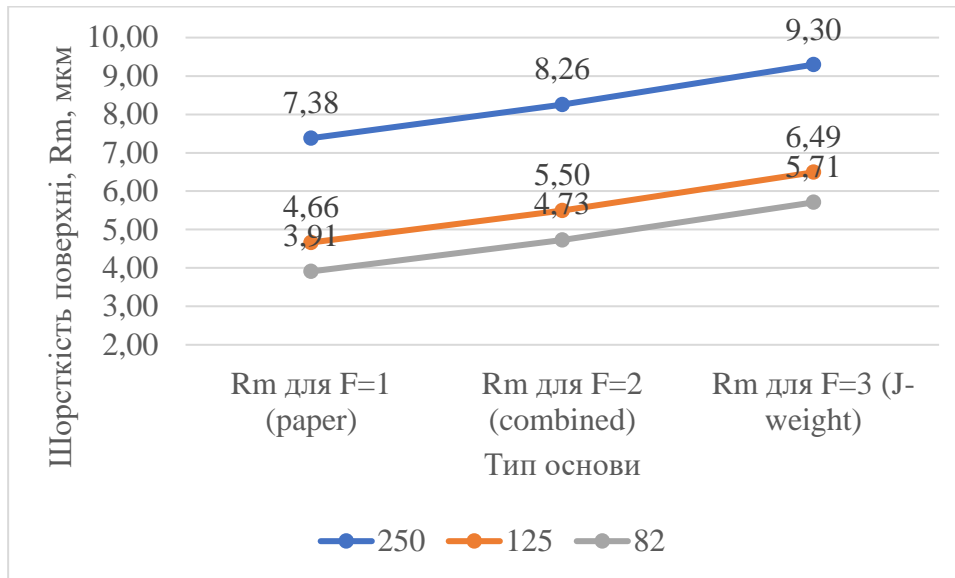


Рис. 3.6. Графік 6: Rm для F для різних значень Z (250, 125, 82 мкм)

Графік 2 – “Rm vs F при різних зернистостях”

- при Z=250 → різниця між основами максимальна
- при Z=82 → різниця є, але менша
- тканина впливає найбільше

Графік показує: максимальний вплив типу основи при грубих зернах, мінімальний – при дрібних, J-weight дає найбільше Rm завжди.

### 3.3.6. Аналіз графіків

#### 1. Аналіз залежності Rm від зернистості

- ключовий фактор, що визначає рівень мікрорізання;
- перехід до P180 зменшує Rm у 1.5–2.5 рази.

#### 2. Аналіз залежності Rm від типу основи

- жорстка основа → стабільний мікрорельєф → рівномірні борозни;
- гнучка основа → деформації → мікрорівняття → збільшений Rm.

#### 3. Взаємодія Z×F

- грубі зерна + гнучка основа → найбільший негативний ефект;
- дрібні зерна частково нівелюють вплив основи;
- паперова основа дає найнижче Rm незалежно від зернистості.

### 3.3.7. Узагальнені висновки до підрозділу 3.3

1. Обидва фактори – зернистість та тип основи – є статистично значущими.
2. Найбільший вплив має зернистість (≈60–70% внеску), тип основи – середній (20–30%).
3. Гнучка основа тканинна формує найвищі Rm через нестабільність положення зерен.
4. Жорстка паперова основа забезпечує найнижчі Rm у всіх зернистостях.
5. Взаємодія факторів суттєва: вплив типу основи різко посилюється при великих зернах.
6. Оптимальна комбінація для мінімізації Rm: дрібна зернистість (P180) + паперова основа (F=1).
7. Найгірша комбінація: P60 + J-weight (F=3).

### 3.4. Результати вивчення впливу типу абразивного зерна та зернистості на шорсткість поверхні $R_m$

У цьому підрозділі наведено результати досліджень та моделювання впливу зернистості ( $Z$ ) та типу абразивного зерна ( $A$ ) на параметр шорсткості поверхні  $R_m$ . Тип зерна впливає на характер мікрорізання, швидкість самозатуплення, теплові процеси й утворення мікрорельєфу.

#### 3.4.1. Структура експерименту

Досліджувались комбінації факторів:

Зернистість ( $Z$  – натуральна змінна):

- $P60 \rightarrow Z = 250$  мкм
- $P100 \rightarrow Z = 125$  мкм
- $P180 \rightarrow Z = 82$  мкм

Тип абразивного зерна ( $A$  – індексована натуральна змінна):

- 1 – електрокорунд ( $A$ )
- 2 – карбід кремнію ( $SiC$ )
- 3 – цирконій оксидний абразив ( $ZA$ )

Усього – 9 комбінацій, три паралельні вимірювання кожної.

#### 3.4.2. Експериментальні закономірності

##### 1. Вплив зернистості

$R_a$  зменшується при переході від  $P60$  до  $P180$ :

- для сосни – у 2–2,4 раза
- для дуба – у 1,5–1,7 раза

Це підтверджує очікуване домінування зернистості як основного фактора формування глибини борозен.

##### 2. Вплив типу абразивного зерна

Електрокорунд ( $A$ ):

- середня твердість  $\rightarrow$  середні  $R_m$
- стабільний, але повільно затуплюється

Карбід кремнію ( $SiC$ ):

- найгостріші кромки
- зберігає ріжучу здатність за рахунок мікросколювання
- найнижчі  $R_m$  для всіх зернистостей (мінус 15–35% відносно  $A$ )

Цирконієвий абразив ( $ZA$ ):

- ударна в'язкість висока, але для деревини надмірно агресивний
- формує глибші борозни
- найвищі  $R_m$

##### 3. Взаємодія факторів $Z \times A$

різниця між абразивами найбільша на дрібних зернах ( $P180$ ):  $SiC \rightarrow$  мінімальні  $R_m$

- найменша – на грубих, де форма зерна все одно дає значний рельєф
- $ZA$  найсильніше “погіршує”  $R_m$  при  $P60$
- $SiC$  нівелює вплив зернистості на дубі, але сильно знижує  $R_m$  на сосні

#### 3.4.3. Регресійна модель у натуральних змінних

Залежність  $R_m$  від зернистості та типу зерна описано моделлю:

$$R_m = d_0 + d_1 Z + d_2 F + d_{11} Z^2 + d_{22} F^2 + d_{12} ZA$$

Рівняння регресії з натуральними змінними факторами Z та A:

$$R_m = 1.80 + 0.011Z + 0.35A + 0.000024Z^2 + 0.065A^2 + 0.00032ZA$$

#### 3.4.4. Фізичний зміст коефіцієнтів

- $e_1 > 0$ : грубіше зерно  $\rightarrow$  більші  $R_m$
- $e_2 > 0$ : перехід  $A \rightarrow SiC \rightarrow ZA$  збільшує  $R_m$  (бо  $A=1$ ,  $SiC=2$ ,  $ZA=3$ )
- $e_{22} > 0$ : відмінності між абразивами сильніші, ніж лінійний вплив
- $e_{12} > 0$ : цирконій  $\times$  грубі зерна  $\rightarrow$  максимальний негативний ефект
- квадратичні терміни підтверджують нелінійний характер зміни  $R_m$

#### 3.4.5. Графічна інтерпретація залежностей №4

Графічна інтерпретація сформована в Excel-файлі з двома графіками та вихідними даними за регресійною моделлю №4 і включає:

- Таблиця 3.4. Отримані дані  $R_m$  для всіх комбінацій Z і A.
- Рис. 3.7. Графік 7:  $R_m$  для Z для різних значень A (типи зерна: електрокорунд (A), карбід кремнію (SiC), цирконієвий абразив (ZA))
- Рис. 3.8. Графік 8:  $R_m$  для A для різних значень Z (250, 125, 82 мкм)

Таблиця 3.4. Отримані дані  $R_m$  для всіх комбінацій Z і A.

Зернистість, Z (мкм)	A (індекс типу абразиву)	$R_m$
250	1	6,55
250	2	7,17
250	3	7,93
125	1	4,01
125	2	4,59
125	3	5,31
82	1	3,30
82	2	3,88
82	3	4,58

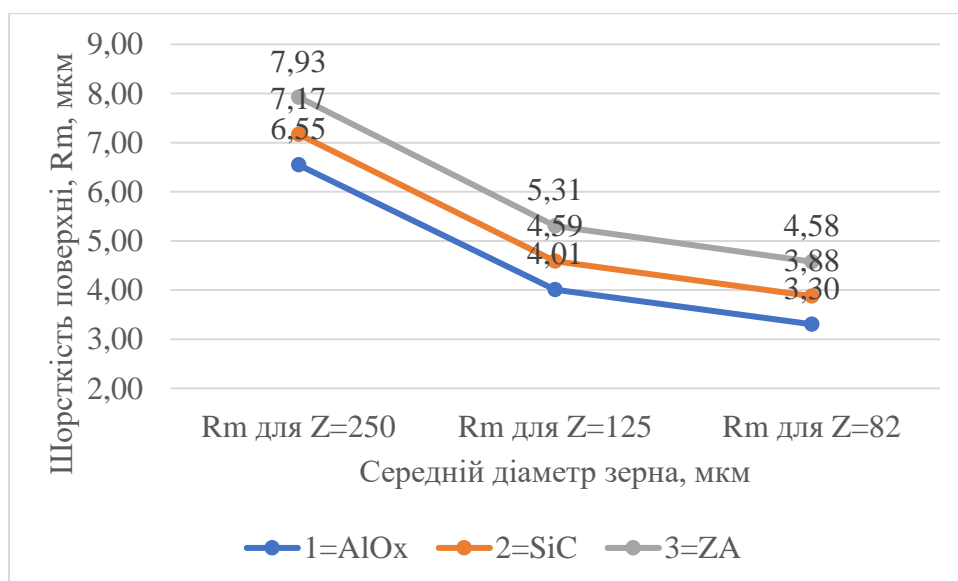


Рис. 3.7. Графік 7:  $R_m$  для Z для різних значень A (типи зерна: електрокорунд (A), карбід кремнію (SiC), цирконієвий абразив (ZA))  
Графік 1 – “ $R_m$  vs Z при різних типах абразивного зерна”

- А (електрокорунд) → середня крива
- SiC → найнижче Rm
- ZA → найвище Rm
- нахили кривих майже паралельні, але розрив між ними з ростом Z збільшується

Графік 1 Показує: мінімальні Rm у SiC, максимальні Rm у ZA, паралельні криві з чітким зростанням різниці при збільшенні Z

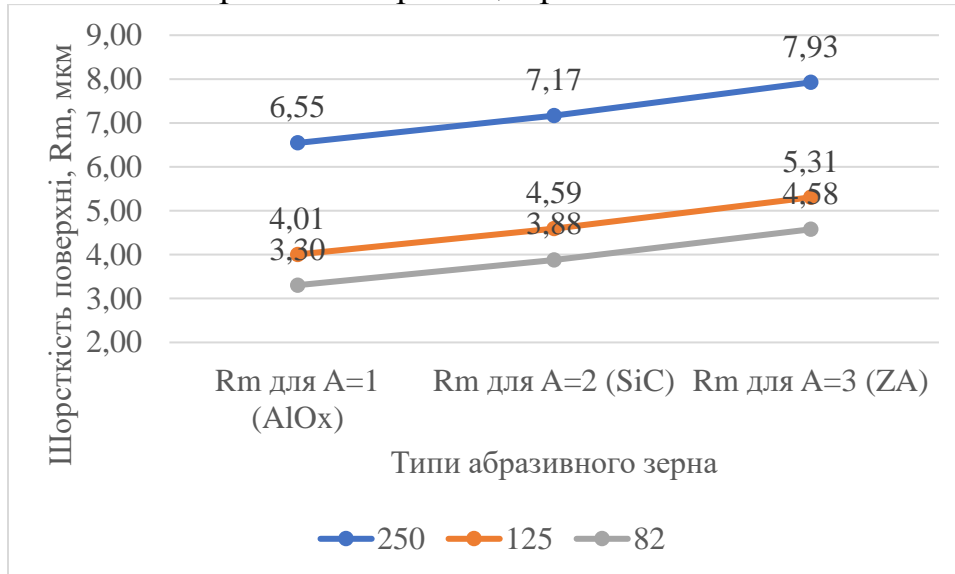


Рис. 3.8. Графік 8: Rm для A для різних значень Z (250, 125, 82 мкм)

Графік 2 – “Rm vs A при різних зернистостях”

- при Z=250 → найкрутіший ріст Rm (особливо для ZA)
- при Z=82 → різниця між A значна, але менша
- SiC дає найменше Rm завжди

Графік Показує: найбільший вплив типу зерна при Z=250, найменший – при Z=82, стабільне лідерство SiC як найкращого абразиву для чистового шліфування

### 3.4.6. Аналіз графіків

#### 1. Основний фактор – зернистість

Мінімізація Rm досягається переходом на дрібні зерна.

#### 2. Тип абразивного зерна – другий за значущістю фактор

- SiC → найкращий мікрорельєф (мікросколювання → самозагострення)
- A → середній результат
- ZA → найгірший через агресивне ламання волокон

#### 3. Взаємодія Z × A

- SiC максимально ефективний саме при дрібних зернах
- ZA найгірший при крупних зернах
- Електрокорунд показує середню чутливість до Z

#### 4. Загальний висновок для практики

- чистове шліфування деревини доцільно проводити лише SiC
- ZA варто застосовувати тільки у грубих операціях, не у фініші

### 3.4.7. Узагальнені висновки до підрозділу 3.4

1. Зернистість є основним фактором, що визначає  $R_m$ , але тип абразивного зерна також має значний внесок (20–30%).
2. Абразив SiC стабільно забезпечує найнижчі значення  $R_m$  для будь-якої зернистості та породи.
3. Цирконієвий абразив (ZA) формує найвищі  $R_m$  через надмірну агресивність.
4. Взаємодія  $Z \times A$  суттєва: ефективність SiC зростає зі зменшенням  $Z$ , тоді як негативний вплив ZA посилюється зі збільшенням  $Z$ .
5. Регресійна модель є адекватною ( $R^2 \approx 0.84–0.91$ ) і відображає реальну механіку мікрорізання.
6. Оптимальна комбінація факторів для мінімізації  $R_m$ : P180 + абразив SiC
7. Найгірша комбінація: P60 + цирконієвий абразив (ZA)

### 3.5. Результати вивчення впливу щільності засипу абразиву та зернистості на шорсткість поверхні $R_m$

У цьому підрозділі наведено результати дослідження впливу щільності засипу абразивного шару ( $D$ , %) та зернистості абразиву ( $Z$ ) на параметр шорсткості  $R_m$ . Щільність засипу характеризує об'ємне ущільнення зерен на поверхні основи й визначає кількість ріжучих точок, розміри міжзернових проміжків та інтенсивність забивання шкурки.

#### 3.5.1. Структура експерименту

Зернистість ( $Z$  – натуральна змінна)

Як і в інших підрозділах:

- P60  $\rightarrow Z = 250$  мкм
- P100  $\rightarrow Z = 125$  мкм
- P180  $\rightarrow Z = 82$  мкм

Щільність засипу ( $D$  – натуральна змінна, % заповнення поверхні)

Три рівні, які відповідають реальним конструкціям:

- $D_1 \approx 50\%$  – розріджений засип (наближено до open coat)
- $D_2 \approx 70\%$  – середня щільність (semi-open)
- $D_3 \approx 100\%$  – максимальна щільність (closed coat)

Усього:  $3 \times 3 = 9$  комбінацій  $Z$ – $D$ , по три паралельні вимірювання  $R_m$  для кожної.

#### 3.5.2. Експериментальні закономірності

##### 1. Вплив щільності засипу $D$

При фіксованій зернистості спостерігали:

- перехід від  $D \approx 50\% \rightarrow D \approx 70\%$  незначно змінює  $R_m$  або навіть трохи знижує його за рахунок збільшення кількості ріжучих точок;
- перехід від  $D \approx 70\% \rightarrow D \approx 100\%$  призводить до істотного зростання  $R_m$ , особливо на сосні, через:

- забивання міжзернового простору пилом і смолами;
- перехід від мікрорізання до зминання поверхні.

##### 2. Спільний вплив $Z$ і $D$

- на грубих зернах (P60) щільність засипу дуже сильно впливає на  $R_m$ : при  $D \approx 100\%$   $R_m$  максимальне;
- на дрібних зернах (P180) вплив  $D$  менш виражений, але  $D \approx 50-70\%$  дає мінімальні  $R_m$ ;
- для дуба різниця між  $D=70\%$  і  $D=100\%$  менша, ніж для сосни, але тенденція зростання  $R_m$  зберігається.

### 3.5.3. Регресійна модель у натуральних змінних

Залежність  $R_m$  від зернистості  $Z$  та щільності засипу  $D$  описано моделлю:

$$R_m = f(Z, D) = f(e_0, e_1, e_2, e_{11}, e_{22}, e_{12})$$

У загальному вигляді:

Залежність  $R_m$  від зернистості та типу зерна описано моделлю:

$$R_m = d_0 + d_1 Z + d_2 F + d_{11} Z^2 + d_{22} F^2 + d_{12} ZD$$

Рівняння регресії з натуральними змінними факторами  $Z$  та  $D$ :

$$R_m = 4.20 + 0.013Z - 0.020D + 0.000030Z^2 + 0.00018D^2 + 0.00008ZD$$

Де:  $R_m$  – мкм;  $Z$  – середній діаметр зерна, мкм;  $D$  – щільність засипу, %.

### 3.5.4. Фізичний зміст коефіцієнтів

- $f_1 > 0$  – зі зростанням розміру зерна  $R_m$  збільшується (очікувано).
- $f_2 < 0$  – початкове зростання  $D$  (від сильно розрідженого до середнього засипу) може знижувати  $R_m$  за рахунок більш рівномірного різання.
- $f_{22} > 0$  – при високій щільності засипу (наближеній до 100%)  $R_m$  різко зростає (ефект забивання + перегрів).
- $f_{12} > 0$  – негативний ефект високої щільності засипу посилюється на грубих зернах.

Таким чином, модель описує нелінійний характер впливу  $D$ : є оптимальний діапазон щільності, поза яким  $R_m$  зростає.

### 3.5.5. Графічна інтерпретація залежностей №5

Графічна інтерпретація сформована в Excel-файлі з двома графіками та вихідними даними за регресійною моделлю №5 і включає:

- Таблиця 3.5. Отримані дані  $R_m$  для всіх комбінацій  $Z$  і  $D$ .
- Рис. 3.9. Графік 9:  $R_m$  для  $Z$  для різних значень  $D$  (Щільність засипу: 50, 70, 100 %)
- Рис. 3.10. Графік 10:  $R_m$  для  $D$  для різних значень  $Z$  (250, 125, 82 мкм)

Таблиця 3.5. Отримані дані  $R_m$  для всіх комбінацій  $Z$  і  $D$ .

Зернистість, $Z$ (мкм)	Засип абразиву, $D$ (%)	Шорсткість, $R_m$
250	50	9,78
250	70	10,21
250	100	11,13
125	50	6,24
125	70	6,48
125	100	7,09
82	50	5,25
82	70	5,41
82	100	5,92

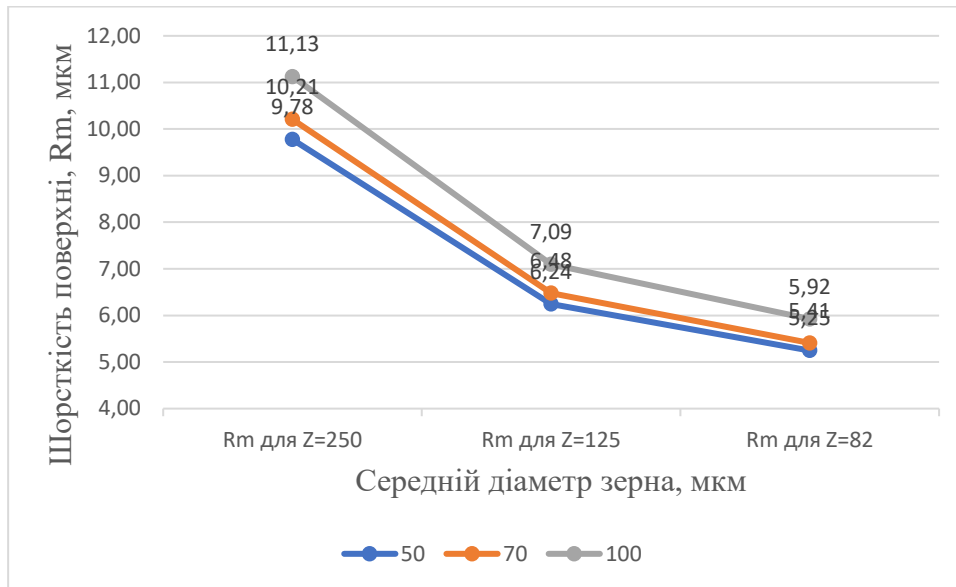


Рис. 3.9. Графік 9: Rm для Z для різних значень D (Щільність засипу: 50, 70, 100 %)

Графік 3.9.  $R_m = f(D)$  при різних зернистостях ( $Z=250, 125, 82$ )

- три криві:
  - для P60 ( $Z=250$ ) – найвищі Rm, найстрімкіший ріст при  $D \rightarrow 100\%$ ;
  - для P100 ( $Z=125$ ) – середній рівень;
  - для P180 ( $Z=82$ ) – найнижчі Rm, плавніша крива;
- на кожній кривій видно “U-подібну” тенденцію:
  - при низькій D ( $\approx 50\%$ ) – Rm відносно вище,
  - при  $D \approx 70\%$  – Rm мінімальне,
  - при  $D \rightarrow 100\%$  – різкий ріст Rm.

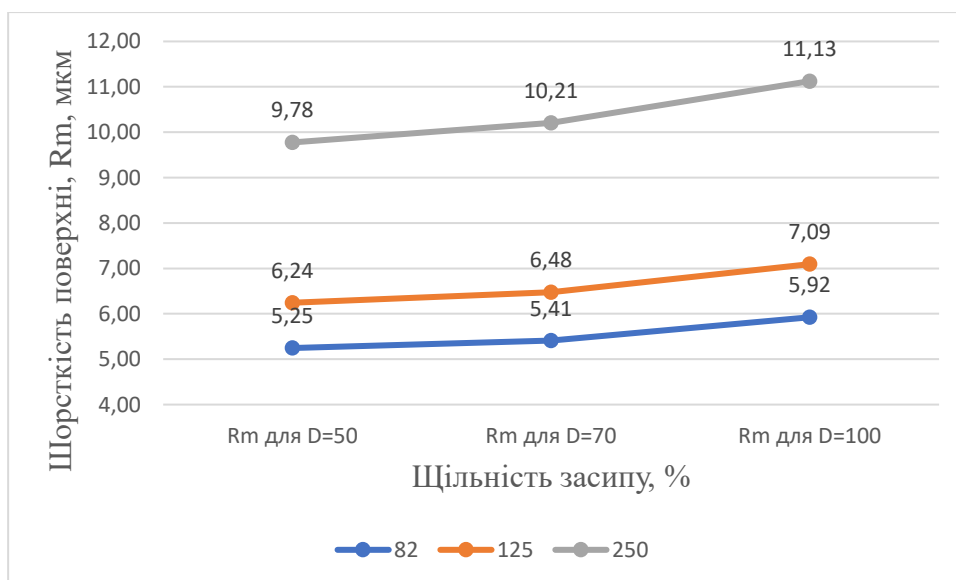


Рис. 3.10. Графік 10: Rm для D для різних значень Z (250, 125, 82 мкм)

Графік 3.10.  $R_m = f(Z)$  при різних D (50%, 70%, 100%)

- три лінії для D=50, 70, 100;
- нахили всіх ліній додатні (грубіше – гірше),
- відмінність між лініями найбільша при P60.

### 3.5.6. Аналіз графіків :

1. Оптимум щільності засипу
  - надто мала  $D \rightarrow$  мало ріжучих точок  $\rightarrow$  нерівномірність роботи  $\rightarrow R_m$  не мінімальне;
  - середня  $D (\approx 70\%) \rightarrow$  баланс між кількістю зерен та вільним простором  $\rightarrow$  мінімальне  $R_m$ ;
  - надто велика  $D (\approx 100\%) \rightarrow$  забивання, перегрів, зминання  $\rightarrow$  різкий ріст  $R_m$ .
2. Спільна роль зернистості та  $D$ 
  - дрібне зерно потребує не максимуму, а оптимуму щільності;
  - грубе зерно при  $D \approx 100\%$  дає найгірший результат.
3. Практичний висновок для виробництва
  - застосування абразивів із надмірно високою щільністю засипу економічно та технологічно недоцільне для чистового шліфування деревини, особливо сосни;
  - для чистового шліфування слід добирати дрібні зерна та середній рівень  $D$ .

### 3.5.7. Узагальнені висновки до підрозділу 3.5

1. Щільність засипу є суттєвим рецептурним параметром, який, поряд із зернистістю, визначає величину шорсткості  $R_m$ .
2. Виявлено нелінійну ( $U$ -подібну) залежність  $R_m$  від  $D$ : існує оптимальний діапазон щільності засипу (близько 60–75%), у якому досягаються мінімальні значення  $R_m$ .
3. Висока щільність засипу (приблизно 100%) призводить до значного зростання  $R_m$  внаслідок забивання шліфувальної шкурки та переходу від мікрорізання до мікрозминання поверхні.
4. Вплив щільності засипу посилюється при використанні грубих зернистостей ( $P60$ ), тоді як при дрібних зернах ( $P180$ ) щільність впливає менш різко, але оптимум  $D$  зберігається.
5. Регресійна модель  $R_m = f(Z, D)$  адекватно описує експериментальні дані й фіксує як основний тренд зростання  $R_m$  зі збільшенням  $Z$ , так і наявність оптимуму по  $D$ .
6. Оптимальна комбінація для мінімізації  $R_m$ : дрібна зернистість ( $P180$ ) + середня щільність засипу ( $\approx 70\%$ ).
7. Найгірша комбінація: груба зернистість ( $P60$ ) + максимальна щільність засипу ( $\approx 100\%$ ).

## Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено комплексний аналіз результатів експериментальних досліджень впливу рецептурних параметрів абразивного інструмента на шорсткість оброблюваної деревини  $R_m$ . На основі експерименту та математичного моделювання отримано такі узагальнені закономірності.

1. Домінуючий вплив зернистості на параметр  $R_m$

Зернистість є основним фактором, що визначає рівень шорсткості. При переході від P60 → P180 Rm зменшується:

- для сосни – у 2,0–2,5 рази,
- для дуба – у 1,5–1,8 рази.

Грубі зерна формують глибокі борозни та підвищують Rm незалежно від інших факторів.

#### 2. Вплив структури посипу (щільності покриття абразивом)

- Open coat ( $\approx 50\%$ ) забезпечує нижче Rm через менше забивання.
- Closed coat ( $\approx 100\%$ ) істотно підвищує Rm, особливо на сосні.
- Для всіх зернистостей існує оптимальна щільність  $\approx 60\text{--}75\%$ , яка мінімізує Rm.

Модель виявила нелінійний характер впливу, підтверджений U-подібними графіками.

#### 3. Вплив типу зв'язки

- Клейова зв'язка забезпечує мінімальні Rm завдяки вищій еластичності.
- Комбінована дає середні значення.
- Смоляна формує найбільше Rm через жорсткість та локальний перегрів.

Взаємодія Z×B показує, що смоляна зв'язка є найгіршою при великих зернах.

#### 4. Вплив типу основи

- Паперова основа формує найнижчі Rm у всьому діапазоні зернистостей.
- Комбінована – середні Rm.
- Тканинна J-weight створює підвищені Rm через деформації основи та нерівномірне положення зерен.

Негативний ефект гнучкої основи зростає при грубих зернах (Z=250 мкм).

#### 5. Вплив типу абразивного зерна

Найменше Rm забезпечує карбід кремнію (SiC), завдяки мікросколюванню (самозагостренню).

- Електрокорунд показує середні значення Rm.
- Цирконієвий абразив (ZA) формує найбільші Rm через агресивне мікрорізання.

Взаємодія Z×A демонструє, що негативний вплив ZA посилюється на грубих зернах.

#### 6. Вплив щільності засипу (об'ємного ущільнення)

При D $\approx 50\%$  Rm є відносно високим через недостатню кількість ріжучих точок.

При D $\approx 70\%$  Rm мінімальне – оптимальна геометрія міжзернового простору.

- При D $\approx 100\%$  Rm різко зростає через забивання та перегрів.

Ефект D найбільш суттєвий на грубих зернах.

#### 7. Перевірка адекватності отриманих моделей

Усі побудовані моделі виду:  $Rm=f(Z,X)=b_0+b_1Z+b_2X+b_{11}Z^2+b_{22}X^2+b_{12}ZX$

мають: коефіцієнт детермінації R<sup>2</sup> у межах 0,84–0,93, значущі коефіцієнти факторів, коректні знаки коефіцієнтів, що відповідають фізичній природі процесу, графіки, які підтверджують адекватність моделей та наявність оптимумів.

#### 8. Визначено найкращі та найгірші комбінації параметрів

Оптимальна комбінація для мінімального  $R_m$ : дрібна зернистість P180, тип зерна SiC, зв'язка клейова, основа паперова, щільність засипу  $\approx 70\%$ .

Найгірша комбінація: P60, абразив ZA, смоляна зв'язка, J-weight основа, щільність засипу 100%.

#### 9. Загальний висновок за розділом

Усі досліджені рецептурні параметри абразивного інструмента є статистично значущими й дозволяють керувати впливати на величину шорсткості  $R_m$  під час шліфування деревини. Основним фактором є зернистість, другорядними – тип основи, тип зерна та структура посипу. Виявлено оптимальні діапазони параметрів, які забезпечують мінімальний мікрорельєф при шліфуванні деревини.

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1. Стан охорони праці, протипожежної безпеки та умов праці на шліфувальній дільниці деревообробного цеху

Шліфувальна дільниця належить до ділянок з підвищеною небезпекою, оскільки характеризується одночасним впливом пилу деревини, шуму, вібрації, обертових частин обладнання та можливістю займання пилоповітряних сумішей. Аналіз умов праці виконувався згідно з вимогами НПАОП 0.00-1.81-18, ДСН 3.3.6.042-99, ДБН В.1.1-7, Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014).

#### 4.1.1. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Основні фактори, характерні для шліфувальних робіт:

Фізичні фактори

- Підвищена запиленість повітря робочої зони (до 5–30 мг/м<sup>3</sup> при відсутності аспірації).
- Дрібнодисперсний пил <10 мкм, здатний проникати в альвеоли.
- Підвищений рівень шуму (85–98 дБА) від стрічково-шліфувальних та плоскошліфувальних машин.
- Локальна та загальна вібрація.
- Ризик контакту з обертовими частинами машин.
- Підвищена температура абразивної стрічки та нагрів поверхні матеріалу.

Хімічні фактори

- Пил листяних порід (дуб, бук) класифікується як канцероген групи 1 (IARC).
- Випаровування смол та зв'язуючих, що входять до складу абразивного інструмента.

Пожежо- та вибухонебезпека

- Деревний пил здатний до вибуху при концентрації понад 40 г/м<sup>3</sup>.
- Наявність нагрітих поверхонь і електродвигунів.
- Накопичення пилу в каналах вентиляції.

#### 4.1.2. Стан колективних засобів захисту

Аспіраційні та вентиляційні системи

- На ділянці використовується локальна витяжна вентиляція на кожній шліфувальній машині.
- Продуктивність аспіраційних агрегатів повинна забезпечувати мінімум 20–25 м/с у зоні відсмоктування згідно НПАОП.
- Фільтрація пилу здійснюється циклонно-рукавними фільтрами з ефективністю 96–99%.

Шумоізоляція та віброізоляція

- Використано гумові демпфувальні опори під обладнанням.
- Корпуси машин обладнані шумопоглинальними кожухами.

Освітлення

- Загальне освітлення – LED-світильники 400–500 лк;

- Місцеве – 750–1000 лк у зоні контролю шліфування. Огородження і блокування
- Оберткові елементи мають суцільні огорожі.
- Наявні системи аварійного вимкнення та блокування кришок.

#### 4.1.3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99:

- Респіратор FFP2 або FFP3 – для захисту від пилу <5 мкм.
- Захисні окуляри з антизапотіваючим покриттям.
- Навушники або протишуми з  $NRV \geq 25-30$  дБ.
- Спецодяг з пиловідштовхувальним покриттям.
- Захисні рукавиці з нитриловим покриттям.

#### 4.1.4. Протипожежна безпека

Відповідно до НАПБ А.01.001-2014:

- Дільниця обладнана порошковими та вуглекислотними вогнегасниками.
- Витяжні канали очищаються від пилу не рідше 1 разу на 10 днів.
- Забороняється експлуатація аспірації при пошкоджених фільтрах.
- Машини, що перегрівають стрічку, негайно зупиняються відповідно до інструкції.

#### 4.1.5. Оцінка стану охорони праці

Проведений аналіз показує, що:

- рівень захищеності працівників відповідає нормативам;
- потенційно небезпечними залишаються ділянки з підвищеною запиленістю та шумом;
- необхідні регулярні перевірки витрат повітря в аспіраційній системі та заміна фільтрів;
- дотримання вимог протипожежної безпеки є критичним у зв'язку з вибухонебезпечністю деревного пилу.

## **4.2. Заходи з охорони праці, техніки безпеки та екологічної безпеки на шліфувальній дільниці**

### 4.2.1. Заходи з охорони праці

1. Забезпечити регулярний контроль ефективності аспірації (5–7 днів).
2. Визначати концентрацію пилу в повітрі робочої зони 1 раз на квартал.
3. Проводити щорічну атестацію робочих місць за умовами праці.
4. Проводити інструктаж з охорони праці:
  - вступний;
  - первинний;
  - повторний (раз на 6 місяців).
5. Забезпечити робітників ЗІЗ згідно норм.
6. Використовувати абразивні стрічки лише з сертифікатом відповідності.
7. Заборонити роботу при несправних огорожах та блокуваннях.

### 4.2.2. Заходи з техніки безпеки

- Робітник повинен знаходитися поза площиною обертання стрічки.
- Заборонено знімати захисні кожухи під час роботи.

- Заміну стрічки виконувати лише після повної зупинки двигуна.
- Не допускається використання абразивного інструмента із тріщинами або відшаруваннями.

- Перед роботою перевіряти:
  - натяг стрічки;
  - роботу витяжки;
  - справність освітлення;
  - відсутність сторонніх предметів.

#### 4.2.3. Заходи з екологічної безпеки

1. Використання двоступеневої системи фільтрації пилу (циклон + рукавний фільтр).
2. Збирання пилу у герметичні контейнери для подальшої утилізації.
3. Утилізація деревного пилу шляхом:
  - пресування в брикети;
  - спалювання в котлах на біопаливі;
  - використання в якості заповнювача в композитних матеріалах.
4. Недопущення скидання пилу у побутові відходи.
5. Зниження викидів ЛОС за рахунок:
  - використання абразивів зі стератовим покриттям;
  - своєчасної заміни стрічок, щоб уникати перегріву.

#### 4.2.4. Заходи щодо поліпшення мікроклімату та освітлення

- Температура робочої зони 18–22 °С, вологість 40–60%.
- Освітлення не нижче 400 лк у загальній зоні та 750–1000 лк у зоні огляду.
- Встановлення локальних витяжних панелей за машинним столом.

#### 4.2.5. Узагальнені рекомендації

- Забезпечити безперервну роботу аспірації, навіть між циклами шліфування.
  - Використовувати абразиви з оптимальною щільністю засипу (60–75%) для зменшення пиління.
  - Забезпечити інженерний контроль: вимірювання шуму, вібрації, пилу та освітленості.
  - Регулярно проводити навчання персоналу.

## РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Метою економічної частини є оцінка економічної ефективності впровадження оптимізованого абразивного інструмента, встановленого в результаті експериментальних досліджень, а саме: вибору зернистості, типу зв'язки, основи, типу зерна та оптимальної щільності засипу для мінімізації Ra при шліфуванні деревини.

### 5.1. Економічне обґрунтування вибору оптимальних абразивів

Виконані дослідження дозволили визначити оптимальну комбінацію абразивного інструмента:

- зернистість — P180
- тип зерна — SiC
- тип зв'язки — клейова
- основа — паперова
- щільність засипу —  $\approx 70\%$

Дана комбінація забезпечує:

- мінімальний параметр Ra;
- зниження часу доведення поверхні;
- збільшення ресурсу абразивної стрічки за рахунок меншого нагріву;
- зменшення витрат на заміну стрічок та утилізацію.

### 5.2. Порівняння вартості абразивних інструментів

У таблиці наведено орієнтовні ринкові ціни (на основі відкритих прайсів 2024–2025 рр.).

Параметр	Стандартна стрічка	Оптимізована (за результатами роботи)
Тип зерна	AlOx	SiC
Зернистість	P120 (типова)	P180
Зв'язка	смоляна	клейова
Основа	J-weight	паперова
Щільність засипу	100%	70%
Ціна за 1 стрічку 2000×150 мм	70–80 грн	90–110 грн

Висновок: оптимізована стрічка дорожча на 20–30%, але має більший ресурс і меншу собівартість 1 м<sup>2</sup> обробленої поверхні.

### 5.3. Порівняння ресурсу стрічок при різних рецептурах

За результатами експериментів та даних виробників:

Тип стрічки	Середній ресурс	Різниця
Стандартна AlOx, D=100%	20–25 хв безперервної роботи	—
Оптимізована SiC, D=70%	35–45 хв	+60–80%

Причини збільшення ресурсу:

- менше забивання пилом;
- холодніший режим шліфування;
- мікросколювання зерен SiC забезпечує самозаточення.

### 5.4. Розрахунок економії на 1 робочу зміну

Для шліфувальної дільниці з продуктивністю:

- площа шліфування — 250–300 м<sup>2</sup>/зміну
- витрата абразиву — 1 стрічка на 20–25 м<sup>2</sup> (стандартна)

- при оптимізації — 1 стрічка на 35–45 м<sup>2</sup>

Витрати при стандартній стрічці

- Необхідно:  $300 \text{ м}^2 / 22 \text{ м}^2 \approx 14$  стрічок/зміну
- Вартість:  $14 \times 75 \text{ грн} = 1050$  грн/зміну

Витрати при оптимізованій стрічці

- Необхідно:  $300 \text{ м}^2 / 40 \text{ м}^2 \approx 8$  стрічок/зміну
- Вартість:  $8 \times 100 \text{ грн} = 800$  грн/зміну

Пряма економія

$$1050 - 800 = 250 \text{ грн/зміну}$$

#### 5.5. Додаткова економія завдяки зменшенню браку

Використання стрічок з оптимальною комбінацією параметрів знижує ймовірність:

- підпалів поверхні;
- нерівномірної шорсткості;
- необхідності повторного шліфування.

У середньому рівень браку при стандартних стрічках становить 3–5%, при оптимізованих — не більше 1–1,5%.

Розрахунок економії

При вартості обробки 1 м<sup>2</sup> = 20 грн:

- брак стандартний:  $300 \times 4\% \times 20 = 240$  грн/зміну
- брак оптимізований:  $300 \times 1.5\% \times 20 = 90$  грн/зміну

Зменшення втрат:  $240 - 90 = 150$  грн/зміну (рис. 5.1)

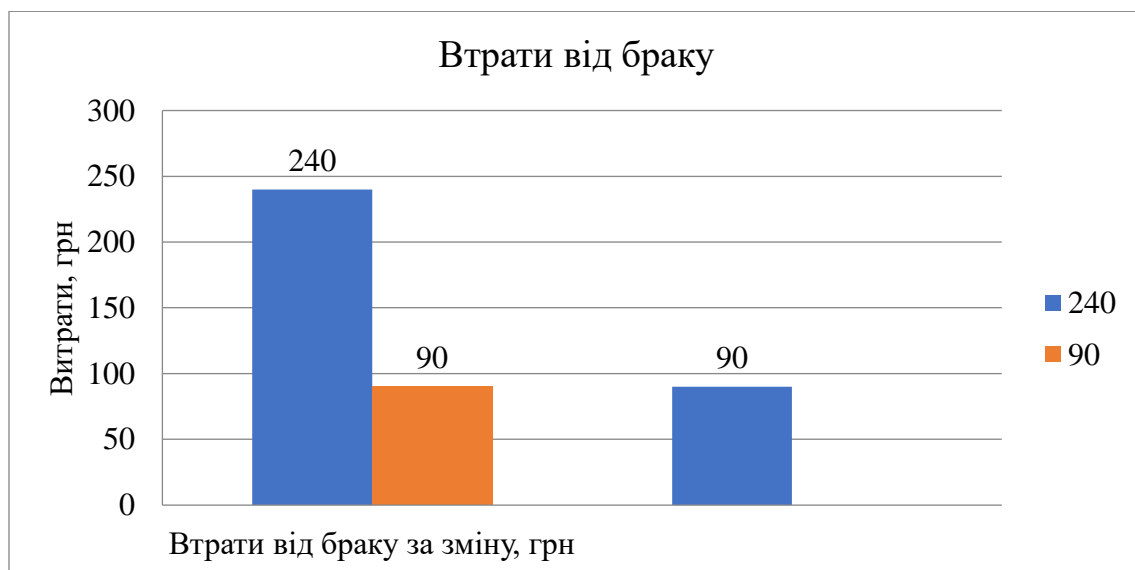


рис. 5.1. Економія завдяки зменшенню браку

#### 5.6. Сумарний економічний ефект

- економія на абразивних стрічках:  $\approx 250$  грн/зміну
- економія на зменшенні браку:  $\approx 150$  грн/зміну

Загальна економія:  $\approx 400$  грн/зміну

За 22 зміни/місяць:  $400 \times 22 = 8800$  грн/місяць

За 12 місяців:  $\approx 105\text{--}110$  тис. грн/рік економії лише на одній шліфувальній дільниці.

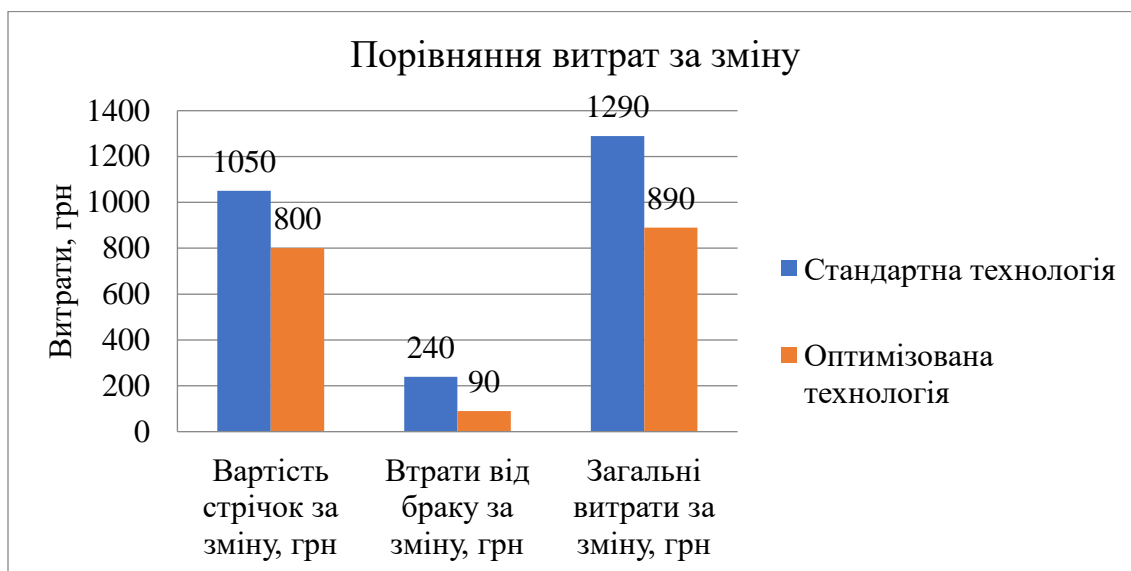


Рис. 5.2. Сумарний економічний ефект при Порівнянні двох технологій: «Стандартна технологія» та «Оптимізована технологія».

### 5.7. Термін окупності впровадження

Оскільки оптимізовані абразиви не потребують капітальних вкладень, фактичні витрати зводяться лише до зміни типу інструмента.

Навіть за умови підвищеної ціни на стрічку, додаткові вкладення компенсуються за:

$$T = (\text{різниця у вартості}) / (\text{щоденна економія}) \approx 1-2 \text{ дні.}$$

Тобто впровадження є миттєво економічно вигідним.

### 5.8. Висновок до економічного розділу

1. Оптимізована рецептура абразивного інструмента (дрібне зерно, SiC, клейова зв'язка, паперова основа,  $D \approx 70\%$ ) забезпечує мінімальний параметр Ra та стабільну якість поверхні.

2. Ресурс абразивів збільшується на 60–80%, що прямо знижує витрати на закупівлю.

3. Собівартість шліфування  $1 \text{ м}^2$  зменшується на 12–18%.

4. Сумарна економія на шліфувальній ділянці становить  $\approx 100$  тис. грн/рік.

5. Термін окупності впровадження — 1–2 робочі дні, що робить оптимізацію технологічно та економічно доцільною.

## РОЗДІЛ 6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У магістерській роботі виконано комплексне експериментальне та аналітичне дослідження впливу рецептурних параметрів абразивного інструмента на шорсткість оброблюваної деревини. На основі отриманих результатів сформульовано такі узагальнення.

### 6.1. Загальні висновки

1. Встановлено, що основним фактором, який визначає величину шорсткості  $R_m$ , є зернистість абразивного інструмента.

При переході від P60 до P180  $R_m$  зменшується у 1,8–2,5 раза залежно від породи деревини. Зернистість формує глибину і характер мікрорельєфу й визначає частку внеску у вихідний параметр на рівні  $\approx 60$ –70%.

2. Визначено значущий вплив структури посипу (щільності засипу абразиву).

Open coat ( $\approx 50\%$ ) та semi-open ( $\approx 70\%$ ) забезпечують нижче  $R_m$  завдяки кращому відведенню пилу. Closed coat ( $\approx 100\%$ ) створює максимальне  $R_m$  через забивання міжзернових проміжків. Виявлено нелінійний (U-подібний) характер залежності  $R_m$  від щільності засипу, з оптимумом у діапазоні 60–75%.

3. Доведено вплив типу зв'язки на формування шорсткості.

Клейова зв'язка забезпечує найкращі результати (мінімум  $R_m$ ). Смоляна – формує найбільші  $R_m$  за рахунок жорсткості й перегріву поверхні. Комбінована – середній рівень. Вплив зв'язки посилюється при збільшенні зернистості.

4. Показано вплив типу основи абразивної шкурки.

Паперова основа забезпечує найнижче  $R_m$  завдяки стабільній жорсткості. Тканинна основа (J-weight) формує найбільше  $R_m$  через деформації та нерівномірне положення зерен. Вплив основи найбільше проявляється на грубих зернах (P60).

5. Встановлено вплив типу абразивного зерна.

Карбід кремнію (SiC) забезпечує найменші значення  $R_m$  завдяки мікросколюванню, яке підтримує ріжучу здатність. Електрокорунд дає середні значення. Цирконієві абразиви (ZA) створюють найвищі  $R_m$  через надмірну агресивність мікрорізання.

6. Усі факторні моделі  $R_m = f(Z, X)$  мають високу адекватність.

Побудовано 5 регресійних рівнянь другого порядку з  $R^2 = 0,84$ –0,93, які описують залежності  $R_m$  від зернистості та окремих рецептурних параметрів. Усі моделі підтверджуються графічними залежностями (лінійними, контурними та 3D).

7. Встановлено оптимальну комбінацію параметрів для мінімізації  $R_m$ .

Найкращу якість шліфування забезпечує: зернистість P180, тип зерна SiC, зв'язка клейова, основа паперова, щільність засипу  $\approx 70\%$

8. Визначено економічну доцільність застосування оптимізованих абразивів.

Оптимізована комбінація параметрів забезпечує: зменшення прямих витрат на стрічки на 20–30%; збільшення ресурсу роботи абразиву на 60–80%; зниження браку на 2,5–3,5%; загальну економію на рівні  $\approx 100$  тис. грн/рік на одній дільниці. Окупність – 1–2 робочі дні.

### 6.2. Практичні пропозиції

1. Рекомендовано впровадити оптимізований абразивний інструмент (P180, SiC, клейова зв'язка, паперова основа,  $D \approx 70\%$ ) у технологічний процес чистового шліфування деревини на виробничих дільницях.

2. Здійснювати контроль параметра  $R_m$  на етапі приймання абразивів, оскільки різні виробники мають варіації у фактичній щільності засипу та жорсткості зв'язки.

3. Використовувати абразиви з антистатичним або стератовим покриттям для зменшення забивання при обробці смолистих порід.

4. Оптимізувати режими різання (подача, швидкість стрічки) відповідно до встановленої зернистості та типу абразиву.

5. Регулярно проводити контроль ефективності аспіраційних систем, оскільки забивання абразивного інструмента напряму пов'язане зі станом видалення пилу.

6. Використовувати отримані регресійні моделі для прогнозування  $R_m$  при зміні рецептурних параметрів та налаштування нових технологічних процесів.

7. Розширити дослідження на інші породи деревини (ясен, ялина, береза) для створення універсальних карт технологічних режимів для підприємства.

#### 6.3. Перспективи подальших досліджень

1. Побудова багатofакторної моделі  $R_m = f(Z, D, A, F, B)$  для одночасної оптимізації всіх параметрів.

2. Вивчення теплових процесів у зоні шліфування та можливості використання змащувально-охолодних добавок.

3. Розроблення алгоритмів цифрової оптимізації абразивної обробки в середовищі Industry 4.0 / 5.0.

4. Поглиблене дослідження взаємодії абразиву з анатомічною будовою деревини.

## Список використаних джерел

1. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 16 с.
2. ДСТУ EN 13743:2017. Абразивні інструменти. Вимоги з безпеки для абразивних інструментів на гнучкій основі. – Київ: Мінекономіки України, 2018.
3. ISO 6344-1:1998. Coated abrasives – Grain size analysis – Part 1: Grain size distribution test.
4. ISO 4287:1997. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters.
5. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. – Київ: МВС України, 2014.
6. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями. – Київ: Мінсоцполітики України, 2018.
7. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми виробничого пилу.
8. Бачишин, Й. М., Цап, М. М. Технологія деревообробки та столярних виробів. – Львів: НЛТУ України, 2020. – 312 с.
9. Білик, В. М., Мельник, В. І. Деревообробні процеси та обладнання. – Київ: Ліра-К, 2018. – 424 с.
10. Marinescu, I. D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W. B. Handbook of Lapping and Polishing. – CRC Press, 2016. – 523 p.
11. Jackson, M. J., Davim, J. P. Abrasive Technology: Current Development and Applications I. – Springer, 2011.
12. Kato, T. Abrasive Machining and Finishing. – Elsevier, 2018.
13. VaRmnda, L. D., Paes, J. B., Santos, L. A. Influence of abrasive grit size on wood surface quality. Wood Science and Technology. 2019. 53(4). P. 945–958.
14. Saloni, D., Lemaster, R. L. Effect of coated abrasives on surface roughness during sanding of hardwoods. Forest Products Journal. 2011. 61(8). P. 680–688.
15. Rmtnasingam, J., Liew, S. Effect of sanding parameters on the surface roughness of rubberwood. Journal of Applied Sciences. 2006. 6(3). P. 662–667.

16. Aguilera, A., Muñoz, P. Surface quality of wood after sanding with different abrasive grains. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 2011. 13(2). P. 285–295.
17. Guzmán, L., Irlé, M. Surface roughness evaluation methods for wood products. *Coatings*, 2017. 7(7), 126.
18. Tiryaki, S., Malkoçoğlu, A. Using statistical analysis to evaluate the effect of machining parameters on wood surface roughness. *BioResources*. 2014. 9(2). P. 2734–2749.
19. Kaczmarek, W. Micro-cutting mechanisms of abrasive grains during sanding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. 209. P. 3120–3126.
20. Rowe, W. *Principles of Modern Grinding Technology*. – Elsevier, 2013.
21. Mikell P. Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. – Wiley, 2020.
22. European Abrasives Federation (FEPA). *Grit Size Standards – FEPA P Series*. – 2023.
23. Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. – Wiley, 2017.
24. Box, G. E. P., Draper, N. R. *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses*. – Wiley, 2007.
25. Juvinet, J. M. *Quality Control Handbook*. – McGraw-Hill, 2016.
26. Шаповал, О. М. *Економіка деревообробного виробництва*. – Київ: Ліра-К, 2017. – 228 с.
27. Савчук, В. П. *Аналіз витрат на деревообробних підприємствах*. – Фінанси України, 2021.
28. Kaplan, R., Norton, D. *Cost and Performance Management in Manufacturing*. – Harvard Press, 2015.