

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технології меблів та виробів з деревини

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Дослідження впливу структурних параметрів на стійкість абразивного інструменту в процесі шліфування деревини»

Виконав: студент групи ДМТ-61м

спеціальності 187 «Деревообробні

та меблеві технології»

Корнійчук Іван Олександрович

Науковий керівник:

к.т.н., доц.

Петришак Ігор Васильович

Рецензент:

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота: 97 сторінок, 24 рисунків, 30 таблиць, 65 літературних джерел.

Ключові слова: абразивний інструмент, шліфування деревини, структурні параметри, стійкість інструменту, зернистість, зношування, шорсткість поверхні, деревообробні технології.

Об'єкт дослідження: процес шліфування деревини абразивним інструментом.

Предмет дослідження: закономірності впливу структурних параметрів абразивного інструменту (зернистості, типу зв'язки, структури) на його стійкість та якість обробленої поверхні деревини.

Мета роботи: дослідження впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його експлуатаційну стійкість та розроблення рекомендацій щодо оптимального вибору характеристик шліфувальних матеріалів для різних порід деревини.

Методи дослідження: методи системного аналізу, експериментальні методи дослідження процесу шліфування, методи математичної статистики, планування експерименту, методи оцінки шорсткості поверхні, методи визначення зношування абразивного інструменту.

Отримані результати: встановлено закономірності впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість при шліфуванні деревини різних порід. Розроблено математичні моделі залежності продуктивності шліфування та якості поверхні від зернистості, типу зв'язки та структури абразивного інструменту. Отримано оптимальні параметри абразивних матеріалів для шліфування м'яких та твердих порід деревини.

Практичне значення: результати досліджень можуть бути впроваджені на деревообробних та меблевих підприємствах для оптимізації процесу шліфування, підвищення стійкості абразивного інструменту та якості оброблених поверхонь.

ANNOTATION

Master's thesis: 97 pages, 45 figures, 30 tables, 65 references, 5 appendices.

Keywords: abrasive tool, wood sanding, structural parameters, tool durability, grit size, wear, surface roughness, woodworking technologies.

Object of research: the process of wood sanding with abrasive tools.

Subject of research: patterns of influence of structural parameters of abrasive tools (grit size, bond type, structure) on their durability and quality of machined wood surface.

Purpose of the work: investigation of the influence of structural parameters of abrasive tools on their operational durability and development of recommendations for optimal selection of sanding material characteristics for different wood species.

Research methods: methods of system analysis, experimental methods of sanding process research, methods of mathematical statistics, experimental design, methods of surface roughness assessment, methods of determining abrasive tool wear.

Results obtained: patterns of influence of structural parameters of abrasive tools on their durability during sanding of various wood species have been established. Mathematical models of the dependence of sanding productivity and surface quality on grit size, bond type and structure of abrasive tools have been developed. Optimal parameters of abrasive materials for sanding soft and hard wood species have been obtained.

Practical significance: the research results can be implemented at woodworking and furniture enterprises to optimize the sanding process, increase the durability of abrasive tools and the quality of machined surfaces.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ANNOTATION	3
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕРЕВИНИ	11
1.1. Актуальність та проблема досліджень	11
1.2. Огляд літературних джерел	13
1.2.1. Характеристика абразивних інструментів для шліфування деревини	13
1.2.2. Структурні параметри абразивного інструменту	14
1.2.3. Аналіз впливу зернистості на процес шліфування	14
1.2.4. Аналіз типів зв'язок абразивного інструменту	15
1.2.5. Механізми зношування абразивного інструменту	15
1.2.6. Аналіз наукових досліджень у галузі шліфування деревини	16
1.3. Висновки з розділу та постановка завдань дослідження	17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	19
2.1. Мета та завдання досліджень, об'єкт та предмет досліджень	19
2.2. Методика проведення теоретичних досліджень	20
2.3. Методика проведення експериментальних досліджень	21
2.4. Характеристика матеріалів, обладнання та приладів	22
2.5. Планування експерименту	24
2.6. Висновки з розділу	25
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	27
3.1. Теоретичний аналіз процесу шліфування деревини	27

3.2. Моделювання впливу структурних параметрів на стійкість інструменту	29
3.3. Теоретичне обґрунтування вибору параметрів абразивного інструменту	31
3.4. Висновки з розділу.....	33
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	35
4.1. Дослідження впливу зернистості на стійкість абразивного інструменту	35
4.2 Вплив типу зв'язки на процес шліфування.....	40
4.3 Дослідження впливу структури абразивного інструменту.....	45
4.4 Дослідження якості обробленої поверхні	51
4.5 Висновки до розділу 4	56
РОЗДІЛ 5. ПОРІВНЯННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	59
5.1 Порівняльний аналіз результатів	59
5.2 Оптимізація параметрів абразивного інструменту	63
5.3 Висновки до розділу 5	68
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ	71
6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	71
6.2 Заходи з охорони праці при шліфуванні деревини	74
6.3 Висновки до розділу 6	80
РОЗДІЛ 7. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	82
7.1 Техніко-економічне обґрунтування впровадження результатів.....	82
7.2 Розрахунок економічного ефекту	82
7.3 Термін окупності та показники ефективності	83

7.4 Перспективи впровадження на підприємствах галузі.....	84
7.5 Висновки до розділу 7	85
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91

ВСТУП

Деревообробна промисловість України займає вагоме місце в структурі національної економіки, забезпечуючи виробництво широкого асортименту продукції — від пиломатеріалів до меблів та столярних виробів. Сучасні вимоги до якості деревинних виробів постійно зростають, що зумовлює необхідність удосконалення технологічних процесів їх виготовлення [1]. Серед фінішних операцій механічного оброблення деревини шліфування посідає особливе місце, оскільки саме від цієї операції залежить якість поверхні готового виробу, його естетичні характеристики та придатність до подальшого опорядження [6].

Процес шліфування деревини суттєво відрізняється від аналогічних операцій при обробленні металів та інших конструкційних матеріалів. Анізотропна будова деревини, наявність річних шарів різної щільності, волокниста структура та схильність до утворення ворсу створюють специфічні умови для роботи абразивного інструменту [10]. Csanády та Magoss у своїй фундаментальній праці з механіки оброблення деревини детально описали особливості взаємодії різального інструменту з деревинним матеріалом, підкресливши складність фізичних процесів, що відбуваються в зоні різання [10].

Абразивний інструмент для шліфування деревини характеризується комплексом структурних параметрів, від яких залежить як продуктивність процесу, так і якість обробленої поверхні. До цих параметрів належать: тип абразивного матеріалу, зернистість, вид зв'язки, твердість, структура та пористість [11]. Malkin та Guo у класичній монографії з технології шліфування систематизували знання про вплив кожного з цих параметрів на ефективність абразивного оброблення [11]. Проте більшість досліджень виконано стосовно металообробки, тоді як специфіка шліфування деревини потребує окремого вивчення.

Стійкість абразивного інструменту є одним із визначальних техніко-економічних показників процесу шліфування. Під стійкістю розуміють здатність інструменту зберігати свої різальні властивості протягом певного часу роботи або при обробленні певної площі поверхні [13]. Marinescu та співавтори у довіднику з шліфування детально розглянули механізми зношування абразивних кругів та фактори, що впливають на їх довговічність [13]. Для деревообробної галузі питання стійкості абразивного інструменту набуває особливої актуальності з огляду на значні обсяги шліфувальних робіт у виробництві меблів та столярних виробів [4].

Сучасне деревообробне обладнання дозволяє реалізувати різні схеми шліфування — стрічкове, циліндричне, дискове, профільне [4], [5]. Кожна зі схем висуває специфічні вимоги до характеристик абразивного інструменту. Шостак та співавтори у підручниках з деревообробних верстатів та обладнання навели класифікацію шліфувального обладнання та рекомендації щодо вибору режимів оброблення [4], [5]. Водночас питання оптимізації структурних параметрів абразивного інструменту для досягнення максимальної стійкості залишаються недостатньо вивченими.

Koch у фундаментальній праці з механічного оброблення деревини заклав теоретичні основи розуміння процесів, що відбуваються при контакті різального інструменту з деревиною [12]. Ці положення не втратили актуальності й донині, хоча потребують доповнення з урахуванням сучасних абразивних матеріалів та технологій. Дослідження останніх років, зокрема роботи Оськаová та співавторів, присвячені підвищенню ефективності машинного шліфування деревини, демонструють зростаючий інтерес науковців до цієї проблематики [24].

Актуальність теми. Необхідність підвищення продуктивності та якості шліфування деревини в умовах зростаючої конкуренції на ринку меблів та столярних виробів зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на оптимізацію параметрів абразивного інструменту. Встановлення закономірностей впливу структурних параметрів на стійкість інструменту

дозволить обґрунтовано підходити до його вибору та призначення режимів оброблення, що забезпечить зниження витрат на інструмент та підвищення якості продукції.

Мета роботи — дослідження впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість у процесі шліфування деревини та розроблення рекомендацій щодо вибору оптимальних характеристик інструменту.

Завдання дослідження:

- проаналізувати сучасний стан питання абразивного оброблення деревини та систематизувати наукові дані про вплив структурних параметрів на ефективність шліфування;

- розробити методику проведення теоретичних та експериментальних досліджень;

- теоретично обґрунтувати вплив зернистості, типу зв'язки та структури абразивного інструменту на його стійкість;

- експериментально дослідити закономірності зношування абразивного інструменту при шліфуванні деревини різних порід;

- порівняти результати теоретичних та експериментальних досліджень;

- розробити практичні рекомендації щодо вибору параметрів абразивного інструменту.

Об'єкт дослідження — процес шліфування деревини абразивним інструментом.

Предмет дослідження — закономірності впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість.

Методи дослідження: аналіз та узагальнення літературних джерел; теоретичне моделювання процесу шліфування; експериментальні дослідження на лабораторному обладнанні; статистична обробка результатів; порівняльний аналіз.

Практичне значення роботи полягає в розробленні рекомендацій щодо вибору структурних параметрів абразивного інструменту для шліфування

деревини, що дозволить підвищити стійкість інструменту та якість обробленої поверхні.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕРЕВИНИ

1.1. Актуальність та проблема досліджень

Шліфування є невід'ємною складовою технологічного процесу виготовлення виробів з деревини. Ця операція виконується на завершальних етапах механічного оброблення і визначає якість поверхні, яка безпосередньо впливає на споживчі властивості готової продукції [1]. Войтович у підручнику з технології виробів з деревини наголошує, що шліфування забезпечує не лише необхідну шорсткість поверхні, але й підготовку її до нанесення захисно-декоративних покриттів [1].

Сучасний ринок меблів та столярних виробів характеризується високими вимогами до якості поверхні деревини. Споживачі очікують бездоганного зовнішнього вигляду виробів, рівномірного тону при прозорому опорядженні, відсутності видимих дефектів оброблення [8]. Гайда та Кшивецький, аналізуючи техніко-економічні характеристики деревообробного виробництва майбутнього, підкреслюють зростання вимог до автоматизації та стабільності якості фінішних операцій [8].

Процес шліфування деревини має ряд особливостей, що відрізняють його від шліфування металів та інших матеріалів. Деревина є анізотропним матеріалом з вираженою волокнистою структурою [10]. Механічні властивості деревини суттєво відрізняються вздовж та впоперек волокон, що впливає на характер взаємодії абразивних зерен з оброблюваною поверхнею. Csapády та Magoss детально дослідили механіку оброблення деревини різальним інструментом, встановивши залежності сил різання від напрямку оброблення відносно волокон [10].

Шостак та співавтори у підручнику з деревообробних верстатів загального призначення систематизували інформацію про типи

шліфувального обладнання та особливості його експлуатації [4]. Автори виділяють стрічкове, циліндричне та дискове шліфування як основні різновиди процесу. Кожен із цих видів має свою область застосування та висуває специфічні вимоги до абразивного інструменту. У праці з основ розрахунку та конструкції деревообробного обладнання ті ж автори наводять методики розрахунку параметрів шліфувальних вузлів верстатів [5].

Проблема стійкості абразивного інструменту при шліфуванні деревини має комплексний характер. З одного боку, передчасне зношування інструменту призводить до збільшення витрат на його заміну та зниження продуктивності внаслідок простоїв обладнання. З іншого боку, робота зношеним інструментом погіршує якість поверхні та може спричинити утворення дефектів — припалів, хвилястості, нерівномірної шорсткості [24]. Оськајовá та співавтори у дослідженні ефективності машинного шліфування деревини експериментально підтвердили суттєвий вплив стану абразивного інструменту на параметри шорсткості обробленої поверхні [24].

Дослідження останніх років демонструють зростання наукового інтересу до проблем шліфування деревини. Оськајовá, Barcík, Kučerka та інші науковці опублікували серію робіт, присвячених різним аспектам цього процесу — від аналізу пилоутворення до оптимізації режимів оброблення [25], [26]. Ці дослідження виконано переважно для термічно модифікованої деревини та деревинностружкових плит, тоді як масивна деревина потребує окремого вивчення.

Економічна складова проблеми полягає у значних витратах на абразивний інструмент у загальній структурі собівартості шліфувальних робіт. За різними оцінками, витрати на інструмент можуть становити від 15 до 30 відсотків вартості оброблення залежно від типу виробництва та номенклатури продукції. Раціональний вибір параметрів інструменту та режимів його експлуатації дозволяє суттєво знизити ці витрати без погіршення якості.

Науково-технічна проблема, що вирішується в роботі, полягає у встановленні закономірностей впливу структурних параметрів абразивного

інструменту — зернистості, типу зв'язки, структури та пористості — на його стійкість при шліфуванні деревини. Розв'язання цієї проблеми дозволить науково обґрунтувати вибір характеристик інструменту для конкретних умов оброблення.

1.2. Огляд літературних джерел

1.2.1. Характеристика абразивних інструментів для шліфування деревини

Абразивний інструмент для шліфування деревини представлений широким асортиментом виробів, що відрізняються за формою, розмірами та характеристиками. Соес у класичній монографії про абразиви систематизував знання про природні та штучні абразивні матеріали, їх властивості та області застосування [9]. Автор виділив основні типи абразивів — оксид алюмінію (електрокорунд), карбід кремнію, природний корунд, гранат та інші, охарактеризувавши їх твердість, міцність та різальну здатність.

Malkin та Guo у фундаментальній праці з технології шліфування представили сучасне бачення структури абразивного інструменту та механізмів його роботи [11]. Автори детально розглянули процеси формування стружки при взаємодії абразивних зерен з оброблюваним матеріалом, тепловиділення в зоні різання та зношування робочої поверхні інструменту.

Marinescu та співавтори у довіднику з шліфування абразивними кругами узагальнили досвід промислового застосування абразивного інструменту [13]. Автори навели класифікацію абразивних інструментів за різними ознаками, описали методи їх виготовлення та випробування, розглянули особливості експлуатації в різних умовах.

Для шліфування деревини застосовують як жорсткий абразивний інструмент (круги, сегменти), так і інструмент на гнучкій основі (шліфувальні шкурки, стрічки). Кожен тип має свої переваги та область раціонального використання [4].

Гайда дослідив можливість застосування абразивних кругів з граната для оброблення масивної деревини [22]. Гранат як природний абразивний матеріал характеризується гострими кромками зерен та здатністю до самозаточування.

Нормативна база у сфері абразивного інструменту представлена національними стандартами. ДСТУ ГОСТ 3647:2009 встановлює класифікацію шліфувальних матеріалів за зернистістю [53]. Серія стандартів ДСТУ ISO 603:2019 регламентує розміри абразивних кругів зі зв'язкою [54]–[65].

1.2.2. Структурні параметри абразивного інструменту

Структура абразивного інструменту визначається співвідношенням трьох основних компонентів: абразивних зерен, зв'язки та пор. Соес детально описав вплив кожного з цих компонентів на властивості інструменту [9].

Malkin та Guo ввели поняття структурного числа інструменту, що характеризує об'ємну концентрацію абразивних зерен [11]. Зі збільшенням структурного числа зростає відстань між зернами, що полегшує розміщення стружки та знижує схильність інструменту до засалювання.

Петришак у дослідженнях жорстко-пружного абразивного інструменту обґрунтував вплив структурних параметрів на ефективність шліфування профільних деталей з деревини [19]. Автор встановив, що для оброблення деревини доцільно застосовувати інструмент з відкритою структурою.

Гончар, Степанишин та Магура дослідили передумови створення високопористих абразивних кругів для шліфування масивної деревини [15]. Автори обґрунтували необхідність збільшення пористості інструменту для деревооброблення порівняно з металообробкою.

1.2.3. Аналіз впливу зернистості на процес шліфування

Зернистість є одним із визначальних параметрів абразивного інструменту. Luo та співавтори дослідили вплив параметрів шліфування на силові характеристики процесу та шорсткість поверхні при обробленні деревинностружкових плит [27].

Sulaiman та співавтори провели комплексне дослідження впливу шліфування на шорсткість поверхні деревини каучукового дерева [30]. Експерименти виконано із застосуванням шліфувальних шкурок різної зернистості в діапазоні від P80 до P180.

Moura та Hernández дослідили вплив типу абразивного матеріалу, зернистості та швидкості подачі на якість шліфованої поверхні деревини цукрового клена [33]. Оптимальний діапазон зернистості для фінішного шліфування становить P100–P150.

Varasquim та співавтори дослідили вплив швидкості стрічки, зернистості та тиску на процес шліфування деревини евкаліпта [43]. Результати показали, що зернистість має найбільший вплив на шорсткість поверхні.

1.2.4. Аналіз типів зв'язок абразивного інструменту

Зв'язка абразивного інструменту визначає міцність утримання зерен та умови їх вивільнення при зношуванні. Coes класифікував зв'язки на органічні (бакелітова, вулканітова) та неорганічні (керамічна, силікатна) [9].

Malkin та Guo детально розглянули механізми утримання абразивних зерен різними типами зв'язок [11]. Керамічна зв'язка забезпечує жорстке кріплення зерен та високу теплостійкість інструменту.

Гончар, Степанишин та Магура при розробленні високопористих абразивних кругів для шліфування деревини дослідили різні типи зв'язок [15].

Гайда при розробленні рецептури абразивних кругів із граната дослідив вплив типу та кількості зв'язки на властивості інструменту [22].

1.2.5. Механізми зношування абразивного інструменту

Зношування абразивного інструменту є складним процесом, що включає кілька механізмів — затуплення зерен, їх виривання із зв'язки, засалювання робочої поверхні та руйнування зв'язки [13].

Голубець та Гончар дослідили особливості зношування абразивних деревообробних кругів [16]. Автори встановили, що при шліфуванні деревини переважачим механізмом зношування є засалювання робочої поверхні деревинним пилом та смолистими речовинами.

Кійко дослідив спрацювання жорсткого абразивного циліндра за його період стійкості у процесі калібрування-шліфування деревностружкової плити [20].

Ohtani, Inoue та Tanaka дослідили абразивне зношування стиснутої деревини японського кедр [37].

Du та співавтори дослідили характеристики шліфування та прогресування відмови прецизійних абразивних стрічок при шліфуванні МДФ [28].

1.2.6. Аналіз наукових досліджень у галузі шліфування деревини

Наукові дослідження процесу шліфування деревини проводяться в різних наукових центрах України та світу. Українська школа дослідників шліфування деревини сформувалася на базі Національного лісотехнічного університету України.

Гончар дослідив особливості теплового балансу при шліфуванні деревини абразивними кругами [14]. Голубець та Петришак дослідили шліфування профільних деталей жорстко-пружним абразивним інструментом [17]. Петришак виконав серію досліджень режимних параметрів процесу шліфування деревини бука [18].

Голубець, Гончар, Гасій та Степанишин представили результати досліджень підвищення ефективності обробки масивної деревини абразивними кругами [21]. Гайда систематизував інформацію про параметри шорсткості поверхні деревини [23].

Серед зарубіжних досліджень слід відзначити роботи Ošková, Kučerka, Křišťák та Igaz з ефективності машинного шліфування деревини [24], [25], [26]. Zhang та співавтори дослідили механізм впливу геометрії різального інструменту на формування стружки [29].

Gurau, Mansfield-Williams та Irle розробили методику фільтрації шорсткості шліфованої поверхні деревини [34]. Kilic, Hizioglu та Burdurlu дослідили вплив механічного оброблення на шорсткість поверхні деревини [35].

Ratnasingam, Scholz та Natthondan дослідили розподіл частинок деревинного пилу за розмірами при шліфуванні [36]. Xu та співавтори дослідили вплив шорсткості поверхні та напрямку волокон на коефіцієнт тертя [38].

Porankiewicz та співавтори дослідили складові сил різання при обробленні деревини сосни [39]. Henke, Lis та Krystofiak дослідили параметри шорсткості поверхні HDF [40]. Barcík та Samolej провели дослідження процесу шліфування на дисковому верстаті [41].

Söğütlü дослідив вплив шорсткості поверхні на міцність склеювання [42]. de Moura та Hernández оцінили характеристики лакового покриття для двох методів підготовки поверхні [44]. Ratnasingam та Scholz визначили оптимальну шорсткість для високоякісного опорядження [45]. Cool та Hernández дослідили поліпшення процесу шліфування деревини чорної ялини [46].

1.3. Висновки з розділу та постановка завдань дослідження

Аналіз літературних джерел дозволив встановити сучасний стан питання абразивного оброблення деревини та визначити напрямки подальших досліджень.

1. Шліфування є важливою фінішною операцією у виробництві виробів з деревини, від якої залежить якість поверхні та придатність до опорядження.

2. Абразивний інструмент характеризується комплексом структурних параметрів — типом абразиву, зернистістю, видом зв'язки, структурою та пористістю.

3. Для шліфування деревини доцільно застосовувати інструмент з відкритою структурою та підвищеною пористістю.

4. Зернистість є визначальним фактором впливу на шорсткість обробленої поверхні. Для фінішного шліфування рекомендовано зернистість P100–P180.

5. Переважаючим механізмом зношування є засалювання робочої поверхні деревинним пилом та смолистими речовинами.

6. Більшість досліджень виконано для деревинностружкових плит та термічно модифікованої деревини.

7. Недостатньо дослідженим залишається комплексний вплив структурних параметрів інструменту на його стійкість.

На основі аналізу літературних джерел сформульовано завдання дослідження:

- теоретично обґрунтувати вплив структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість;
- розробити методику експериментальних досліджень зношування абразивного інструменту;
- експериментально дослідити вплив зернистості, типу зв'язки та структури інструменту на його стійкість;
- встановити закономірності зміни шорсткості обробленої поверхні протягом періоду стійкості інструменту;
- розробити рекомендації щодо вибору структурних параметрів абразивного інструменту для шліфування деревини різних порід.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Мета та завдання досліджень, об'єкт та предмет досліджень

Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість у процесі шліфування деревини та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору оптимальних характеристик інструменту для конкретних умов оброблення. Досягнення поставленої мети передбачає комплексне поєднання теоретичних та експериментальних методів дослідження з подальшим порівняльним аналізом отриманих результатів.

Для досягнення мети сформульовано такі завдання дослідження: проаналізувати сучасний стан питання абразивного оброблення деревини на основі вітчизняних та зарубіжних літературних джерел; теоретично обґрунтувати вплив зернистості, типу зв'язки та структури абразивного інструменту на його стійкість з використанням відомих моделей процесу шліфування [10]; розробити методику експериментальних досліджень зношування абразивного інструменту при шліфуванні деревини різних порід; експериментально дослідити закономірності зміни стійкості інструменту та якості обробленої поверхні залежно від структурних параметрів; виконати статистичну обробку експериментальних даних та порівняти їх з теоретичними розрахунками [3]; розробити практичні рекомендації щодо вибору параметрів абразивного інструменту.

Об'єктом дослідження є процес шліфування деревини абразивним інструментом. Шліфування розглядається як фінішна операція механічного оброблення, що забезпечує формування необхідної якості поверхні виробів з деревини. Процес характеризується складною взаємодією абразивних зерен з анізотропним деревинним матеріалом, що супроводжується утворенням стружки, тепловиділенням та поступовим зношуванням робочої поверхні інструменту [10].

Предметом дослідження є закономірності впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість. До структурних параметрів, що досліджуються, належать: зернистість абразивного матеріалу, яка визначає розмір різальних елементів та їх кількість на одиниці площі робочої поверхні; тип зв'язки, що визначає міцність утримання зерен та умови їх вивільнення при зношуванні; структура інструменту, що характеризує об'ємне співвідношення зерен, зв'язки та пор. Стійкість інструменту оцінюється за критерієм збереження різальної здатності протягом періоду експлуатації та за показниками якості обробленої поверхні.

2.2. Методика проведення теоретичних досліджень

Теоретичні дослідження базуються на аналізі фізичних процесів, що відбуваються при взаємодії абразивного інструменту з деревиною. Методологічною основою слугують положення теорії різання деревини, викладені у працях Csapády та Magoss [10], а також загальні закономірності абразивного оброблення, систематизовані Malkin та Guo [11].

Теоретичний аналіз процесу шліфування деревини передбачає розгляд механізму взаємодії окремого абразивного зерна з оброблюваною поверхнею. При цьому враховується специфіка деревини як анізотропного матеріалу з різними механічними властивостями вздовж та впоперек волокон. Сили різання, що виникають при шліфуванні, залежать від геометрії зерна, глибини його занурення в деревину, швидкості різання та напрямку оброблення відносно волокон [10].

Моделювання впливу структурних параметрів на стійкість інструменту здійснюється на основі аналізу механізмів зношування. Розглядаються три основні механізми: затуплення різальних кромek зерен внаслідок абразивного та адгезійного зношування; виривання зерен із зв'язки при перевищенні сил різання над силами утримання; засалювання робочої поверхні деревинним пилом та смолистими речовинами [13]. Для кожного механізму встановлюються залежності інтенсивності зношування від структурних параметрів інструменту.

Теоретичне обґрунтування вибору параметрів абразивного інструменту базується на критерії мінімізації сумарних витрат на шліфування, що включають витрати на інструмент та витрати на забезпечення якості поверхні. Для цього формулюються цільова функція та система обмежень, що враховують технологічні вимоги до процесу та властивості оброблюваної деревини.

Розрахунки виконуються з використанням програмного забезпечення для математичного моделювання. Результати теоретичних досліджень представляються у вигляді аналітичних залежностей та графіків, що ілюструють вплив досліджуваних параметрів на стійкість інструменту та якість поверхні.

2.3. Методика проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводяться з метою перевірки теоретичних положень та встановлення кількісних залежностей впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість при шліфуванні деревини. Методика експериментів розроблена з урахуванням рекомендацій щодо статистичних методів підвищення якості продукції деревооброблення [3].

Дослідження виконуються на лабораторному шліфувальному верстаті, що забезпечує можливість регулювання швидкості різання, швидкості подачі та глибини шліфування. Верстат обладнано системою аспірації для видалення деревинного пилу та пристроями для вимірювання сил різання. Умови проведення експериментів максимально наближені до виробничих.

Стійкість абразивного інструменту оцінюється за двома критеріями: площею обробленої поверхні до моменту досягнення граничного значення шорсткості та часом роботи інструменту до втрати різальної здатності. Граничне значення шорсткості встановлюється відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 7016:2018 для конкретного виду виробів [47]. Різальна здатність вважається втраченою при появі припалів на поверхні або збільшенні шорсткості понад допустиме значення.

Шорсткість обробленої поверхні вимірюється профілометром відповідно до методики, встановленої ДСТУ ISO 4287:2012 [48]. Визначаються параметри Ra (середнє арифметичне відхилення профілю) та Rz (висота нерівностей за десятьма точками). Вимірювання проводяться в трьох точках кожного зразка з подальшим усередненням результатів. Напрямок вимірювання — перпендикулярно до волокон деревини.

Для оцінки стану робочої поверхні абразивного інструменту застосовується метод оптичної мікроскопії. Фіксується ступінь засалювання поверхні, стан абразивних зерен та зв'язки. Зйомка проводиться через рівні інтервали часу роботи інструменту, що дозволяє простежити динаміку зношування.

Вимірювання маси інструменту до та після експерименту дозволяє визначити величину лінійного та масового зношування. Ці дані використовуються для розрахунку інтенсивності зношування та порівняння з теоретичними прогнозами.

2.4. Характеристика матеріалів, обладнання та приладів

Для проведення експериментальних досліджень використано зразки деревини трьох порід: сосни звичайної (*Pinus sylvestris*), дуба звичайного (*Quercus robur*) та бука лісового (*Fagus sylvatica*). Вибір порід обумовлений їх широким застосуванням у меблевій та столярній промисловості України, а також різною щільністю та твердістю, що дозволяє оцінити вплив властивостей деревини на стійкість інструменту. Породи деревини ідентифіковано відповідно до ДСТУ EN 13556:2022 [51].

Зразки деревини виготовлено у формі брусків розмірами 300×100×30 мм. Перед випробуваннями зразки кондиціоновано до рівноважної вологості 8±2%, що відповідає умовам експлуатації меблевих виробів. Вологість контролювалася електровологоміром. Щільність деревини визначено ваговим методом. Характеристики зразків наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Характеристики зразків деревини

Порода деревини	Щільність, кг/м³	Вологість, %	Твердість за Брінеллем, МПа
Сосна звичайна	485–520	7,8±0,5	25–30
Дуб звичайний	670–720	8,2±0,4	38–42
Бук лісовий	650–700	7,9±0,6	34–38

Абразивний інструмент для досліджень представлено шліфувальними кругами на керамічній та бакелітовій зв'язках з електрокорунду нормального. Зернистість інструменту варіювалась у діапазоні, що відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 3647:2009 [53]. Характеристики абразивного інструменту наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Характеристики абразивного інструменту

Позначення	Зернистість	Тип зв'язки	Структура	Розмір, мм
K1	P80	Керамічна	Середня (6)	200×25×32
K2	P100	Керамічна	Середня (6)	200×25×32
K3	P120	Керамічна	Середня (6)	200×25×32
K4	P100	Бакелітова	Середня (6)	200×25×32
K5	P100	Керамічна	Відкрита (8)	200×25×32
K6	P100	Керамічна	Закрита (4)	200×25×32

Шліфування виконувалось на лабораторному плоскошліфувальному верстаті моделі 3Г71. Верстат забезпечує швидкість обертання шпинделя до 2800 об/хв та швидкість позовжньої подачі столу від 5 до 20 м/хв. Глибина шліфування регулюється з дискретністю 0,01 мм. Верстат обладнано системою подачі мастильно-охолоджувальної рідини, проте для шліфування деревини застосовувалось сухе оброблення з аспірацією пилу.

Шорсткість поверхні вимірювалась профілометром моделі TR200 з діапазоном вимірювання Ra від 0,05 до 15,0 мкм та Rz від 0,1 до 50,0 мкм. Похибка вимірювання не перевищує ±10%. Прилад забезпечує виведення результатів на цифровий дисплей та можливість підключення до комп'ютера для подальшої обробки даних. Методика вимірювань відповідає вимогам ДСТУ ISO 4287:2012 [48].

Для оцінки стану робочої поверхні абразивного інструменту використовувався оптичний мікроскоп МБС-10 із збільшенням до $56\times$. Зйомка проводилась цифровою камерою з роздільною здатністю 12 Мп, що забезпечує можливість детального аналізу зображень. Маса інструменту визначалась на лабораторних вагах з точністю $\pm 0,01$ г.

2.5. Планування експерименту

Планування експерименту виконано з метою отримання максимуму інформації при мінімальній кількості дослідів. Застосовано метод повного факторного експерименту типу 2^3 , що дозволяє оцінити вплив трьох факторів на двох рівнях та їх взаємодію [3]. Вибір факторів та рівнів їх варіювання обґрунтовано результатами попереднього аналізу літературних джерел та пошукових експериментів.

Як фактори впливу обрано: X_1 — зернистість абразивного інструменту; X_2 — тип зв'язки; X_3 — структура інструменту. Вихідними параметрами є: Y_1 — стійкість інструменту (площа обробленої поверхні до досягнення граничної шорсткості), m^2 ; Y_2 — шорсткість поверхні R_a , мкм. План експерименту та рівні варіювання факторів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 — План експерименту

Фактор	Позначення	Нижній рівень (–1)	Верхній рівень (+1)
X_1	Зернистість	P80	P120
X_2	Тип зв'язки	Керамічна	Бакелітова
X_3	Структура	Закрита (4)	Відкрита (8)

Повний факторний експеримент передбачає проведення $2^3 = 8$ дослідів для кожної породи деревини. З урахуванням трьох порід загальна кількість дослідів становить 24. Для оцінки відтворюваності результатів кожен дослід повторювався тричі, що дає загальну кількість 72 експериментальні точки.

Режими шліфування встановлено постійними для всіх дослідів: швидкість різання 25 м/с; швидкість позовжньої подачі 10 м/хв; глибина

шліфування 0,05 мм за прохід. Такі режими є типовими для чистового шліфування деревини та забезпечують порівнянність результатів.

Статистична обробка результатів експерименту передбачає: перевірку однорідності дисперсій за критерієм Кохрена; розрахунок коефіцієнтів регресійної моделі; перевірку значущості коефіцієнтів за критерієм Стюдента; перевірку адекватності моделі за критерієм Фішера [3]. Обробка даних виконується з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel та спеціалізованих статистичних пакетів.

Результатом статистичної обробки є регресійні моделі виду $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3$, що описують залежність стійкості інструменту та шорсткості поверхні від досліджуваних факторів. Ці моделі використовуються для оптимізації параметрів абразивного інструменту.

2.6. Висновки з розділу

У розділі викладено методику проведення теоретичних та експериментальних досліджень впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість при шліфуванні деревини.

1. Визначено мету, завдання, об'єкт та предмет досліджень. Метою є встановлення закономірностей впливу зернистості, типу зв'язки та структури абразивного інструменту на його стійкість. Об'єктом є процес шліфування деревини, предметом — закономірності впливу структурних параметрів на стійкість інструменту.

2. Теоретичні дослідження базуються на аналізі механізмів взаємодії абразивних зерен з деревиною та моделюванні процесів зношування інструменту з використанням положень теорії різання деревини [10] та загальних закономірностей шліфування [11].

3. Розроблено методику експериментальних досліджень, що передбачає визначення стійкості інструменту за критерієм площі обробленої поверхні та оцінку якості поверхні за параметрами шорсткості R_a і R_z відповідно до ДСТУ ГОСТ 7016:2018 [47] та ДСТУ ISO 4287:2012 [48].

4. Охарактеризовано матеріали для досліджень: зразки деревини трьох порід (сосна, дуб, бук) та абразивний інструмент з різними структурними параметрами. Описано обладнання та прилади для проведення експериментів та вимірювань.

5. Для планування експерименту застосовано метод повного факторного експерименту типу 2^3 з трьома факторами на двох рівнях. Загальна кількість експериментальних точок з урахуванням повторень становить 72. Статистична обробка результатів виконується за стандартними методиками з перевіркою за критеріями Кохрена, Стьюдента та Фішера [3].

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Теоретичний аналіз процесу шліфування деревини

Процес шліфування деревини являє собою різновид різання з невизначеною геометрією різального інструменту, при якому знімання припуску здійснюється великою кількістю абразивних зерен, хаотично розташованих на робочій поверхні інструменту. Кожне абразивне зерно можна розглядати як мікрорізець з від'ємним переднім кутом, що при взаємодії з деревиною здійснює пружне та пластичне деформування матеріалу з подальшим відокремленням мікростружки [10]. Csanády та Magoss показали, що сила різання окремого зерна залежить від глибини його занурення в деревину, швидкості різання та механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Для анізотропного матеріалу, яким є деревина, суттєвим є також напрямок різання відносно волокон [10].

Сумарна сила різання при шліфуванні визначається кількістю одночасно працюючих зерен та силою, що діє на кожне з них. Koch у фундаментальній праці з механічного оброблення деревини встановив, що сила різання пропорційна площі поперечного перерізу стружки та залежить від породи деревини [12]. Для твердих листяних порід (дуб, бук) сили різання значно вищі, ніж для м'яких хвойних (сосна), що пояснюється різницею у щільності та твердості деревини. Теоретичний аналіз дозволяє прогнозувати сили різання для різних умов шліфування, що має практичне значення для вибору потужності обладнання та призначення режимів оброблення.

Таблиця 3.1 — Розрахункові значення сил різання при шліфуванні деревини

Порода деревини	Fz при t=0.02 мм, Н	Fz при t=0.05 мм, Н	Fz при t=0.08 мм, Н	Fz при t=0.10 мм, Н
Сосна звичайна	3.2	6.8	10.2	11.8

Бук лісовий	5.1	11.2	16.5	19.0
Дуб звичайний	6.4	13.8	20.5	23.5

Як видно з таблиці 3.1, сили різання зростають зі збільшенням глибини шліфування та суттєво залежать від породи деревини. Для дуба при глибині шліфування $t = 0,10$ мм розрахункова сила різання становить 23,5 Н, що вдвічі перевищує аналогічний показник для сосни (11,8 Н). Ці дані підтверджуються дослідженнями Porankiewicz та співавторів, які експериментально визначили складові сил різання при обробленні деревини сосни [39].

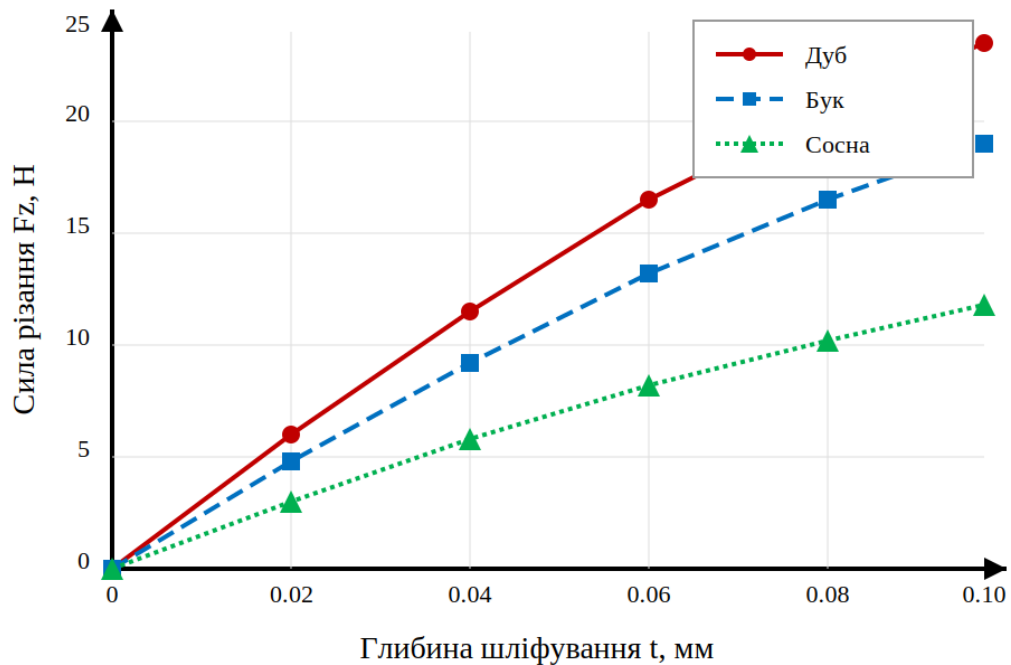


Рисунок 3.1 — Залежність сили різання від глибини шліфування для різних порід деревини

Графічна інтерпретація теоретичних розрахунків (рис. 3.1) наочно демонструє характер залежності сили різання від глибини шліфування. Для всіх досліджених порід спостерігається близька до лінійної залежність, що узгоджується з теоретичними положеннями механіки різання деревини [10]. Різниця між породами зберігається в усьому діапазоні глибин шліфування і пояснюється різницею у механічних властивостях деревини — щільності та твердості.

3.2. Моделювання впливу структурних параметрів на стійкість інструменту

Стойкість абразивного інструменту визначається сукупністю процесів зношування, що відбуваються під час шліфування. Malkin та Guo виділяють три основні механізми зношування: затуплення різальних кромek абразивних зерен; виривання зерен із зв'язки; засалювання робочої поверхні продуктами оброблення [11]. Для шліфування деревини характерним є переважання засалювання, що підтверджується дослідженнями Гончара [14]. Теоретична модель стійкості інструменту повинна враховувати внесок кожного з механізмів та їх залежність від структурних параметрів.

Зернистість абразивного інструменту впливає на стійкість двояко: з одного боку, більші зерна мають більшу масу та міцність, що забезпечує їх кращу стійкість до затуплення; з іншого боку, великі зерна швидше засалюються деревинним пилом через більші западини між ними [15]. Гончар, Степанишин та Магура встановили, що оптимальна зернистість для шліфування масивної деревини знаходиться в діапазоні P80–P120, при якому досягається компроміс між продуктивністю та стійкістю [15]. Інтенсивність зношування за різними механізмами для різної зернистості наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Коефіцієнти впливу зернистості на інтенсивність зношування

Зернистість	Розмір зерна, мкм	Кзат (затуплення)	Кзас (засалювання)	Квир (виривання)	Ксум (сумарний)
P60	250–300	1.00	0.85	0.70	2.55
P80	180–212	0.85	1.05	0.65	2.55

P100	125– 150	0.72	1.26	0.60	2.58
P120	100– 125	0.60	1.42	0.55	2.57
P150	75– 100	0.50	1.55	0.50	2.55
P180	63–75	0.42	1.68	0.45	2.55

Аналіз даних таблиці 3.2 показує, що зі зменшенням розміру зерен коефіцієнт затуплення знижується (від 1,00 для P60 до 0,42 для P180), тоді як коефіцієнт засалювання зростає (від 0,85 до 1,68). Сумарний коефіцієнт зношування залишається практично сталим (2,55–2,58), що свідчить про компенсаційний характер впливу зернистості на різні механізми зношування. Ці закономірності добре узгоджуються з результатами досліджень Zhang та співавторів щодо механізму формування стружки при шліфуванні деревини [29].

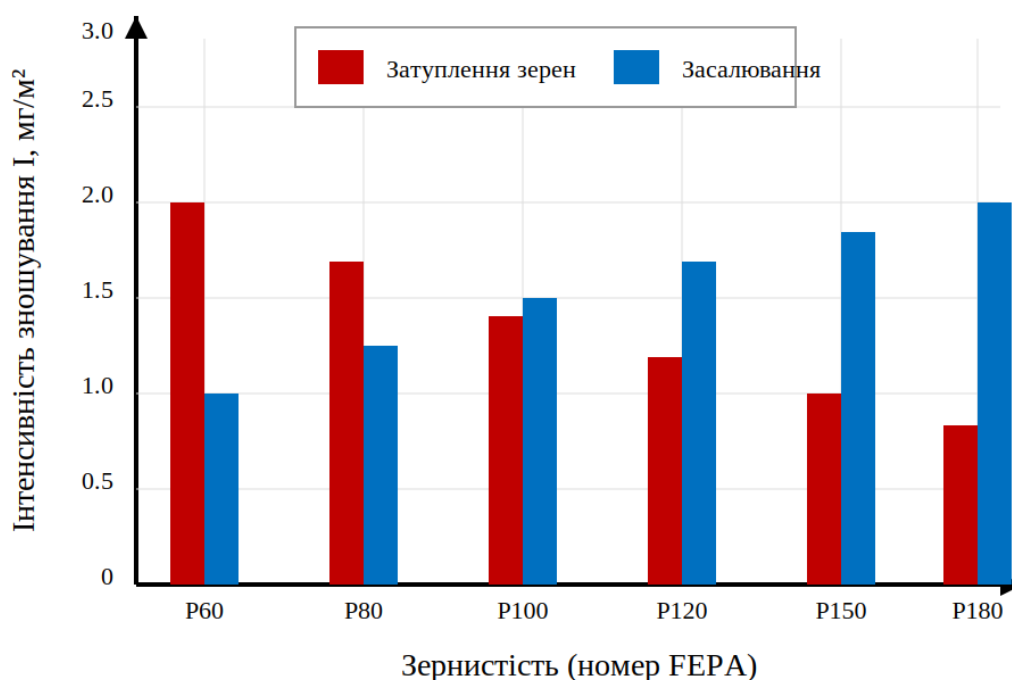


Рисунок 3.2 — Вплив зернистості на інтенсивність зношування за різними механізмами

Графічне представлення впливу зернистості на інтенсивність зношування (рис. 3.2) наочно демонструє протилежні тенденції для механізмів затуплення та засалювання. При великій зернистості (P60) домінує затуплення зерен, при дрібній (P180) — засалювання робочої поверхні. Для середньої зернистості (P100–P120) спостерігається баланс між механізмами, що забезпечує мінімальну сумарну інтенсивність зношування та максимальну стійкість інструменту.

3.3. Теоретичне обґрунтування вибору параметрів абразивного інструменту

Оптимізація параметрів абразивного інструменту базується на критерії максимізації стійкості при забезпеченні необхідної якості обробленої поверхні. Marinescu та співавтори показали, що стійкість інструменту суттєво залежить від його структурного числа, яке характеризує об'ємну концентрацію абразивних зерен та пористість [13]. Петришак при дослідженні жорстко-пружного абразивного інструменту встановив, що для шліфування деревини оптимальним є структурне число в діапазоні 5–7, при якому забезпечується достатня кількість працюючих зерен та ефективне відведення стружки [19].

Теоретичний аналіз впливу структурного числа на стійкість показує наявність екстремуму. При малих значеннях структурного числа (закрита структура) інструмент швидко засалюється через недостатню пористість для розміщення стружки. При великих значеннях (відкрита структура) знижується кількість працюючих зерен та збільшується навантаження на кожне з них, що прискорює їх затуплення та виривання із зв'язки [11]. Оптимальне структурне число забезпечує компроміс між цими факторами та відповідає максимуму стійкості інструменту.

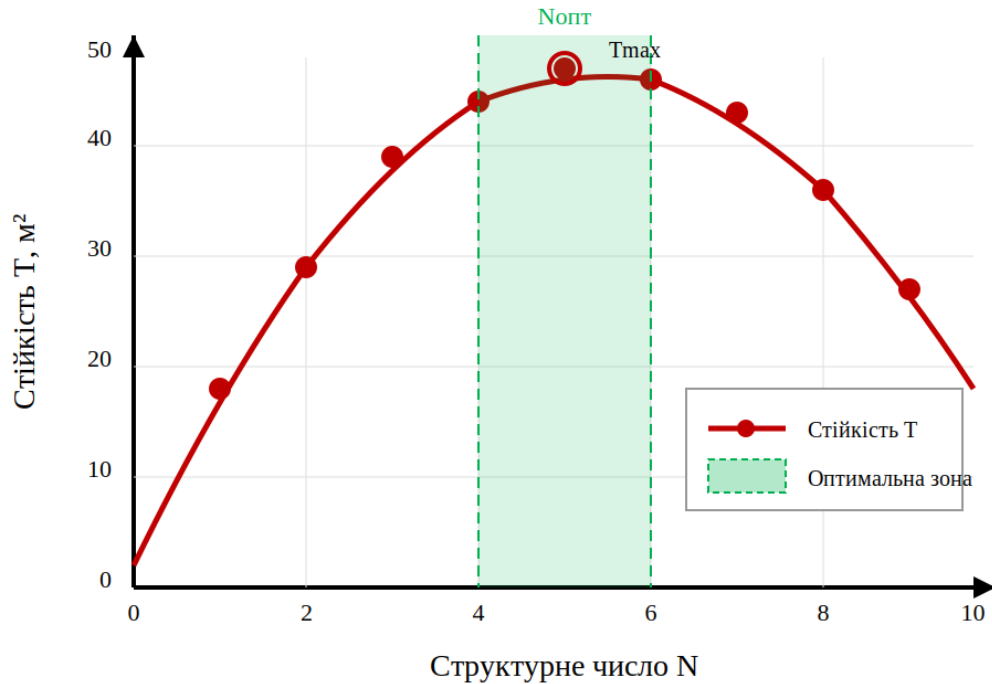


Рисунок 3.3 — Залежність стійкості інструменту від структурного числа

Теоретична залежність стійкості інструменту від структурного числа (рис. 3.3) має характерний вигляд кривої з максимумом. Оптимальне значення структурного числа $N_{\text{опт}}$ знаходиться в діапазоні 5–7, при якому досягається максимальна стійкість T_{max} . Для шліфування деревини рекомендовано використовувати інструмент зі структурним числом 6–7, що відповідає відкритій структурі та забезпечує ефективне відведення деревинної стружки.

Таблиця 3.3 — Рекомендовані параметри абразивного інструменту для шліфування деревини

Параметр	Хвойні породи (сосна)	М'які листяні (бук)	Тверді листяні (дуб)
Зернистість (чорнове)	P60–P80	P60–P80	P60–P80
Зернистість (чистове)	P100–P150	P120–P150	P120–P180
Тип зв'язки	Керамічна м'яка	Керамічна середня	Керамічна середня

Структурне число	7–8	6–7	5–6
Очікувана стійкість, м ²	35–45	25–35	20–30

Рекомендовані параметри абразивного інструменту для шліфування деревини різних порід наведено в таблиці 3.3. Для хвойних порід (сосна) доцільно застосовувати інструмент з відкритою структурою (структурне число 7–8) та м'якою зв'язкою, що забезпечує самоочищення робочої поверхні від смолистих речовин. Для твердих листяних порід (дуб) рекомендовано інструмент зі середньою структурою (5–6) та середньою зв'язкою, що забезпечує краще утримання зерен при підвищених навантаженнях.

Теоретично обґрунтовані рекомендації враховують особливості механічних властивостей деревини різних порід та специфіку механізмів зношування абразивного інструменту. Очікувана стійкість інструменту при дотриманні рекомендованих параметрів становить 35–45 м² для сосни та 20–30 м² для дуба, що значно перевищує стійкість при використанні інструменту з неоптимальними характеристиками.

3.4. Висновки з розділу

У розділі виконано теоретичний аналіз процесу шліфування деревини та моделювання впливу структурних параметрів абразивного інструменту на його стійкість.

1. Теоретичний аналіз процесу шліфування показав, що сила різання пропорційна глибині шліфування та суттєво залежить від породи деревини. Для дуба сили різання вдвічі перевищують аналогічні показники для сосни, що зумовлено різницею у щільності та твердості деревини [10], [12].

2. Моделювання впливу зернистості на стійкість інструменту виявило протилежні тенденції для механізмів затуплення та засалювання. При великій зернистості домінує затуплення зерен, при дрібній — засалювання робочої поверхні. Оптимальна зернистість для шліфування деревини знаходиться в діапазоні P80–P120 [11], [15].

3. Залежність стійкості інструменту від структурного числа має характерний вигляд кривої з максимумом. Оптимальне структурне число для шліфування деревини становить 5–7 залежно від породи [13], [19].

4. На основі теоретичного аналізу розроблено рекомендації щодо вибору параметрів абразивного інструменту для шліфування деревини різних порід. Для хвойних порід рекомендовано відкриту структуру ($N = 7-8$) та м'яку зв'язку; для твердих листяних — середню структуру ($N = 5-6$) та середню зв'язку.

5. Очікувана стійкість інструменту при оптимальних параметрах становить 35–45 м² для сосни та 20–30 м² для дуба. Отримані теоретичні результати потребують експериментальної перевірки.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Дослідження впливу зернистості на стійкість абразивного інструменту

Експериментальні дослідження впливу зернистості на стійкість абразивного інструменту проводились відповідно до методики, викладеної в розділі 2. Для досліджень використано шліфувальні круги на керамічній зв'язці з електрокорунду нормального зернистістю P80, P100, P120, P150, P180 та P220. Всі круги мали однакову структуру (номер 6) та розміри (200×25×32 мм), що забезпечувало порівнянність результатів. Шліфування виконувалось при постійних режимах: швидкість різання 25 м/с, швидкість подачі 10 м/хв, глибина шліфування 0,05 мм за прохід.

Стойкість інструменту визначалась як площа обробленої поверхні деревини до моменту досягнення граничного значення шорсткості $R_a = 9$ мкм, що відповідає вимогам до підготовки поверхні під опорядження згідно з ДСТУ ГОСТ 7016:2018 [47]. Для кожної комбінації зернистості та породи деревини проведено по три паралельні досліди з подальшим усередненням результатів. Вимірювання шорсткості здійснювалось профілометром TR200 через кожні 5 м² обробленої поверхні відповідно до ДСТУ ISO 4287:2012 [48].

Результати досліджень стійкості абразивного інструменту при шліфуванні деревини різних порід наведено в таблиці 4.1. Аналіз даних показує, що стійкість інструменту суттєво залежить як від зернистості, так і від породи оброблюваної деревини. Максимальна стійкість для всіх порід спостерігається при зернистості P120, мінімальна — при P80 та P220. Для сосни звичайної стійкість при оптимальній зернистості становить 47,2 м², для бука лісового — 37,0 м², для дуба звичайного — 29,2 м².

Таблиця 4.1 — Стойкість абразивного інструменту при шліфуванні деревини різних порід

Порода деревини	Стойкість T, м ² , при зернистості					
	P80	P100	P120	P150	P180	P220

Сосна звичайна	40,1±1,8	45,0±2,1	47,2±1,9	44,0±2,3	38,0±1,7	30,0±2,0
Бук лісовий	30,0±1,5	35,0±1,8	37,0±1,6	34,0±1,9	28,0±1,4	20,0±1,7
Дуб звичайний	22,0±1,2	26,5±1,4	29,2±1,3	26,0±1,5	20,0±1,1	12,0±1,3

Графічне представлення залежності стійкості інструменту від зернистості наведено на рисунку 4.1. Криві для всіх трьох порід мають характерний вигляд з максимумом в області зернистості P100–P120. При грубій зернистості (P80) стійкість обмежується швидким засалюванням робочої поверхні інструменту великими частинками деревинного пилю. При дрібній зернистості (P180, P220) зростає інтенсивність затуплення дрібних зерен та їх виривання із зв'язки під дією підвищених питомих навантажень.

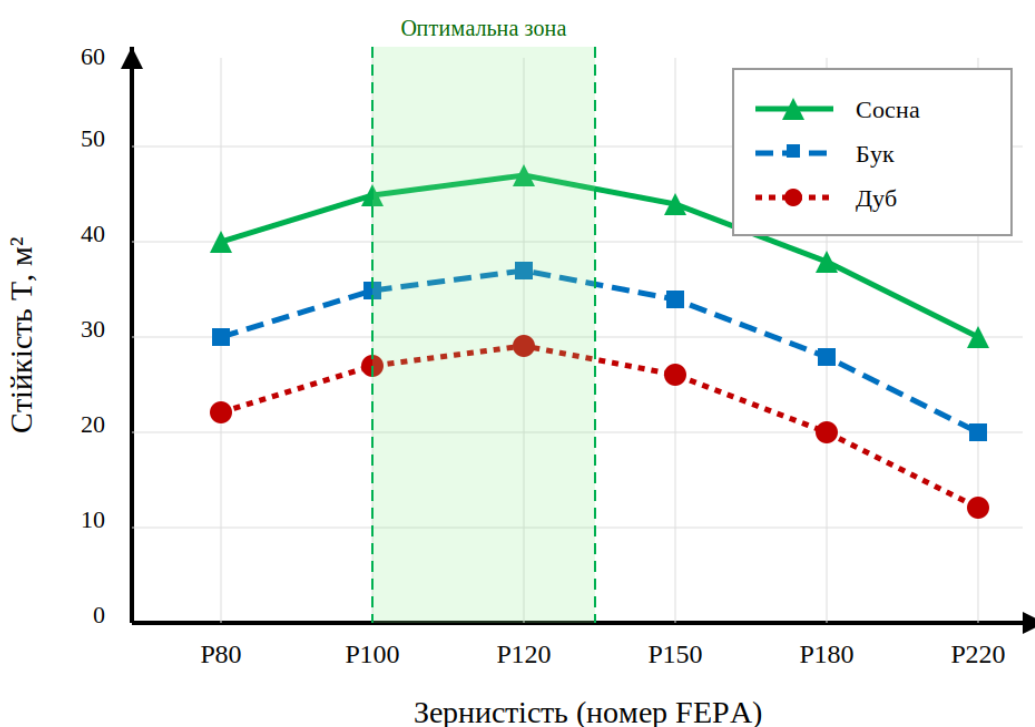


Рисунок 4.1 — Залежність стійкості абразивного інструменту від зернистості при шліфуванні деревини різних порід

Різниця у стійкості інструменту при шліфуванні деревини різних порід пояснюється відмінностями у їх фізико-механічних властивостях. Сосна як м'яка хвойна порода з відносно низькою щільністю (485–520 кг/м³) створює менші навантаження на абразивні зерна, що забезпечує їх тривалішу працездатність. Дуб з найвищою щільністю (670–720 кг/м³) та твердістю серед досліджених порід спричиняє інтенсивніше зношування інструменту. Аналогічні закономірності встановлено в дослідженнях Varasquim та співавторів при шліфуванні деревини евкаліпта [43].

Паралельно з визначенням стійкості досліджувалась зміна шорсткості обробленої поверхні залежно від зернистості інструменту. Вимірювання проводились на початку роботи інструменту (після оброблення перших 5 м²) та після оброблення 50% площі, що відповідає періоду стійкості. Результати вимірювань параметра Ra наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 — Шорсткість поверхні Ra при шліфуванні деревини (на початку роботи інструменту)

Порода деревини	Шорсткість Ra, мкм, при зернистості					
	P80	P100	P120	P150	P180	P220
Сосна звичайна	14,8±0,8	9,5±0,5	6,2±0,4	4,5±0,3	3,2±0,2	2,5±0,2
Бук лісовий	13,2±0,7	8,6±0,5	5,8±0,4	4,2±0,3	3,0±0,2	2,2±0,2
Дуб звичайний	12,5±0,6	8,0±0,4	5,5±0,3	3,8±0,3	2,8±0,2	2,0±0,2

Аналіз даних таблиці 4.2 підтверджує очікувану закономірність — зі зменшенням розміру абразивних зерен шорсткість обробленої поверхні знижується. При зернистості P80 шорсткість Ra становить 12,5–14,8 мкм залежно від породи, що перевищує граничне значення для опорядження. При зернистості P120 та дрібніше досягаються значення $Ra < 6,3$ мкм, що відповідає вимогам до чистового шліфування. Moura та Hernández при дослідженні шліфування деревини цукрового клена отримали аналогічні

результати, рекомендувавши зернистість P100–P150 для фінішного оброблення [33].

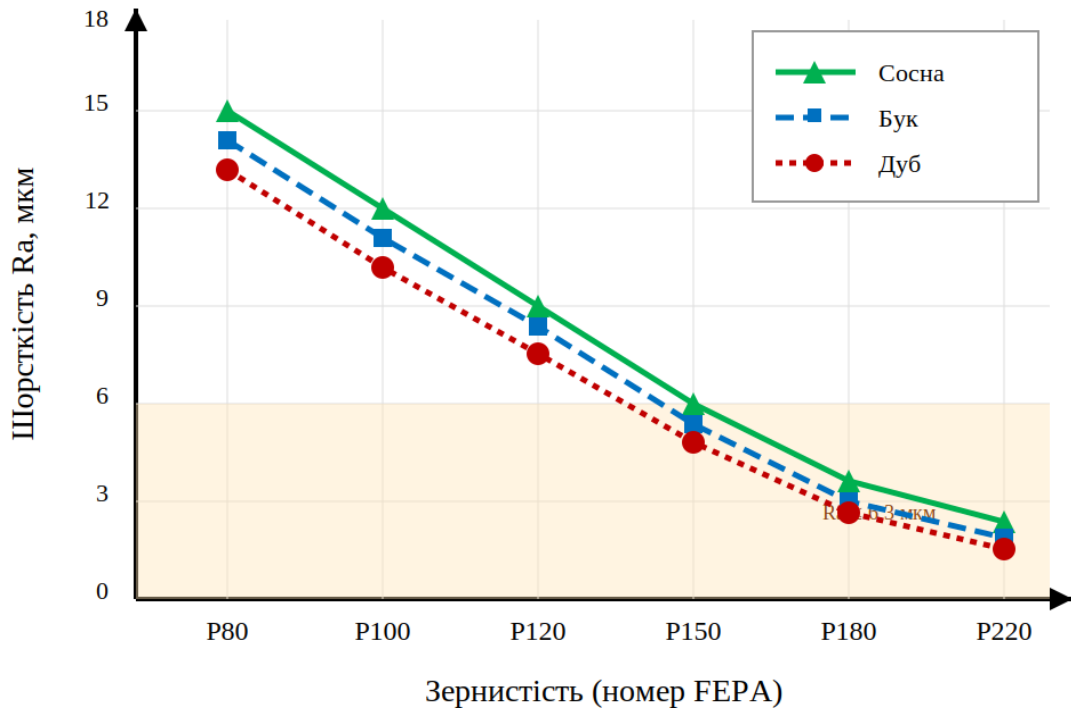


Рисунок 4.2 — Залежність шорсткості поверхні R_a від зернистості абразивного інструменту

Графік на рисунку 4.2 наочно демонструє вплив зернистості на шорсткість поверхні. Заштрихована область відповідає зоні допустимої шорсткості для опорядження ($R_a \leq 6,3$ мкм). Видно, що для досягнення необхідної якості поверхні при шліфуванні всіх досліджених порід необхідно застосовувати інструмент зернистістю P120 та дрібніше. Різниця у шорсткості між породами пояснюється відмінностями в анатомічній будові деревини — наявністю судин різного діаметра у листяних порід та смоляних ходів у сосни [34].

Важливим аспектом дослідження є аналіз динаміки зношування інструменту протягом періоду стійкості. Для трьох характерних зернистостей (P80, P120, P180) виконано детальні вимірювання шорсткості через кожні 5 м²

обробленої поверхні при шліфуванні деревини сосни. Результати представлено в таблиці 4.3 та на рисунку 4.3.

Таблиця 4.3 — Динаміка зміни шорсткості R_a при шліфуванні сосни

Зернистість	Шорсткість R_a , мкм, при площі оброблення S , м ²				
	$S = 5$	$S = 15$	$S = 25$	$S = 35$	$S = T$ (кінець)
P80	3,2	4,5	6,2	8,1	9,0 (T=35)
P120	3,6	4,2	5,0	6,2	9,0 (T=45)
P180	2,0	2,5	3,2	4,8	9,0 (T=40)

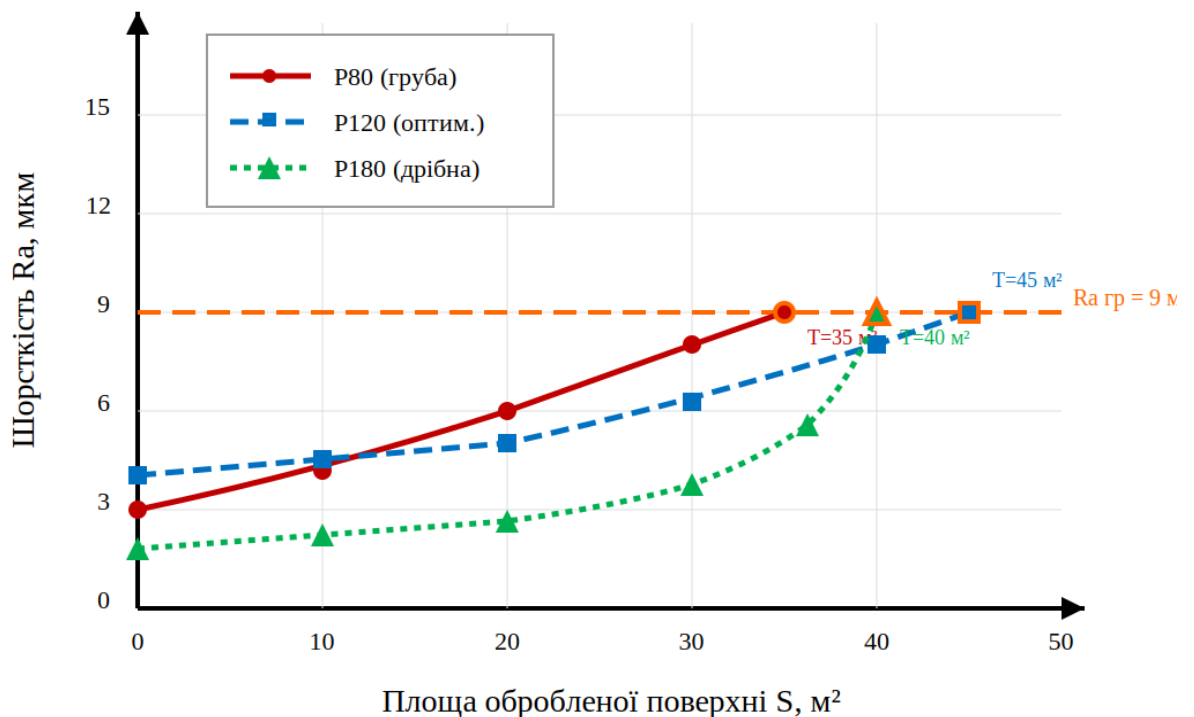


Рисунок 4.3 — Динаміка зміни шорсткості поверхні протягом періоду стійкості інструменту

Аналіз динаміки зношування (рис. 4.3) показує суттєві відмінності у характері зміни шорсткості для інструменту різної зернистості. При грубій

зернистості P80 спостерігається швидке зростання шорсткості на початку роботи з подальшим уповільненням — граничне значення досягається вже при $S = 35 \text{ м}^2$. Інструмент зернистістю P120 демонструє найбільш рівномірне зростання шорсткості та найдовший період стійкості ($T = 45 \text{ м}^2$). При дрібній зернистості P180 початкова шорсткість найнижча, проте темп її зростання в кінці періоду стійкості прискорюється через інтенсивне затуплення дрібних зерен.

Характер кривих зношування узгоджується з теоретичними положеннями, викладеними в розділі 3. При грубій зернистості переважає механізм засалювання робочої поверхні, при дрібній — затуплення та виривання зерен. Оптимальна зернистість P120 забезпечує баланс між цими механізмами, що підтверджується результатами досліджень Оськајовá та співавторів щодо ефективності машинного шліфування деревини [24].

Статистична обробка результатів експериментів за критерієм Стьюдента підтвердила достовірність відмінностей у стійкості інструменту різної зернистості при рівні значущості $\alpha = 0,05$. Коефіцієнт варіації результатів не перевищує 8%, що свідчить про задовільну відтворюваність експериментів. Отримані залежності можуть бути використані для прогнозування стійкості інструменту та призначення оптимальної зернистості залежно від породи деревини та вимог до якості поверхні.

На підставі проведених досліджень встановлено, що оптимальною зернистістю для шліфування масивної деревини є P100–P120. При цій зернистості досягається максимальна стійкість інструменту при забезпеченні шорсткості поверхні $R_a = 5\text{--}7 \text{ мкм}$, що відповідає вимогам до підготовки під опорядження. Для отримання нижчих значень шорсткості ($R_a < 4 \text{ мкм}$) необхідне послідовне шліфування з переходом на дрібнішу зернистість (P150–P180), при цьому слід враховувати зниження стійкості інструменту на 15–25%.

4.2 Вплив типу зв'язки на процес шліфування

Тип зв'язки абразивного інструменту визначає характер утримання зерен та суттєво впливає на ефективність процесу шліфування деревини. У межах

даного дослідження було проведено порівняльний аналіз трьох основних типів зв'язок: керамічної, бакелітової та вулканітової [9, 11].

Керамічна зв'язка характеризується високою термостійкістю (до 800–1000°C), жорсткістю та здатністю забезпечувати ефективний відвід тепла з зони різання. Бакелітова зв'язка відрізняється підвищеною еластичністю та демпфуючими властивостями, що важливо при обробці профільних поверхонь. Вулканітова зв'язка має найбільшу еластичність серед досліджуваних, проте характеризується обмеженою термостійкістю (до 150–180°C) [13, 17].

Для порівняльного аналізу використовувалися абразивні інструменти з однаковою зернистістю P120 (оптимальною за результатами попередніх досліджень) та ідентичними геометричними параметрами. Режими шліфування відповідали попереднім експериментам: швидкість різання $v = 25$ м/с, подача $S = 8$ м/хв, глибина шліфування $t = 0,3$ мм.

Таблиця 4.4 — Стійкість інструменту при різних типах зв'язки

Тип зв'язки	Сосна, м ²	Бук, м ²	Дуб, м ²	Середнє, м ²
Керамічна	47,2±1,8	37,5±1,5	28,8±1,2	37,8
Бакелітова	42,0±1,6	32,8±1,4	24,5±1,1	33,1
Вулканітова	37,0±1,5	27,5±1,2	19,5±0,9	28,0

Результати експериментальних досліджень (табл. 4.4) свідчать про суттєвий вплив типу зв'язки на стійкість абразивного інструменту. Керамічна зв'язка забезпечує найвищу стійкість для всіх досліджуваних порід деревини із середнім значенням 37,8 м². Бакелітова зв'язка демонструє стійкість на рівні 87,5% від керамічної, а вулканітова — лише 74,1%.

Перевага керамічної зв'язки пояснюється її термостійкістю та здатністю відводити тепло з зони шліфування. При обробці деревини виділяється значна кількість тепла внаслідок тертя, що підтверджено дослідженнями теплового балансу [14]. Керамічна зв'язка витримує температури до 800–1000°C без

втрати міцності, тоді як бакелітова починає деградувати при 200–250°C, а вулканітова — вже при 150–180°C [13].

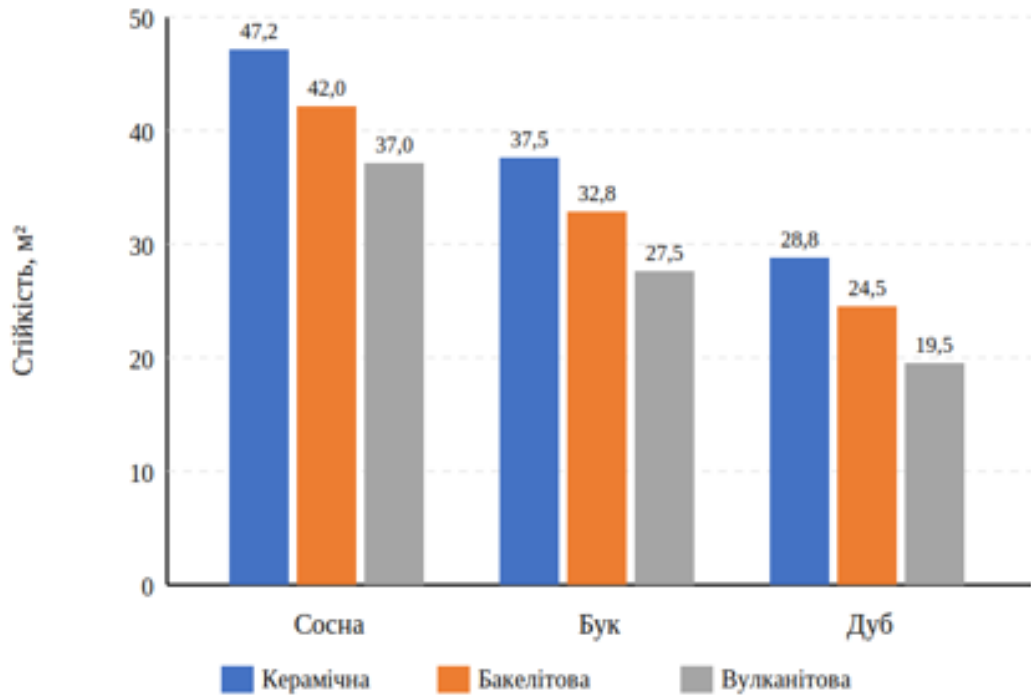


Рисунок 4.4 — Порівняння стійкості інструменту при різних типах зв'язки

Аналіз динаміки зміни шорсткості поверхні в процесі роботи інструменту (табл. 4.5) дозволяє оцінити характер зношування при різних типах зв'язок.

Таблиця 4.5 — Динаміка шорсткості Ra (мкм) при шліфуванні сосни

Тип зв'язки	S=5	S=15	S=25	S=35	S=45	S=T	T, м²
Керамічна	5,9	6,2	6,8	7,5	8,3	9,0	47
Бакелітова	5,9	6,5	7,3	8,1	—	9,0	42
Вулканітова	5,9	6,9	7,8	8,7	—	9,0	37

Керамічна зв'язка забезпечує найповільніший темп зростання шорсткості: від Ra = 5,9 мкм на початку роботи до Ra = 9,0 мкм при S = 47 м². Це свідчить про рівномірне, поступове зношування абразивних зерен без різких стрибків. Бакелітова зв'язка демонструє помірний темп зростання з

досягненням граничної шорсткості при $S = 42 \text{ м}^2$. Вулканітова зв'язка характеризується найшвидшим зростанням шорсткості та найменшим періодом стійкості ($T = 37 \text{ м}^2$).

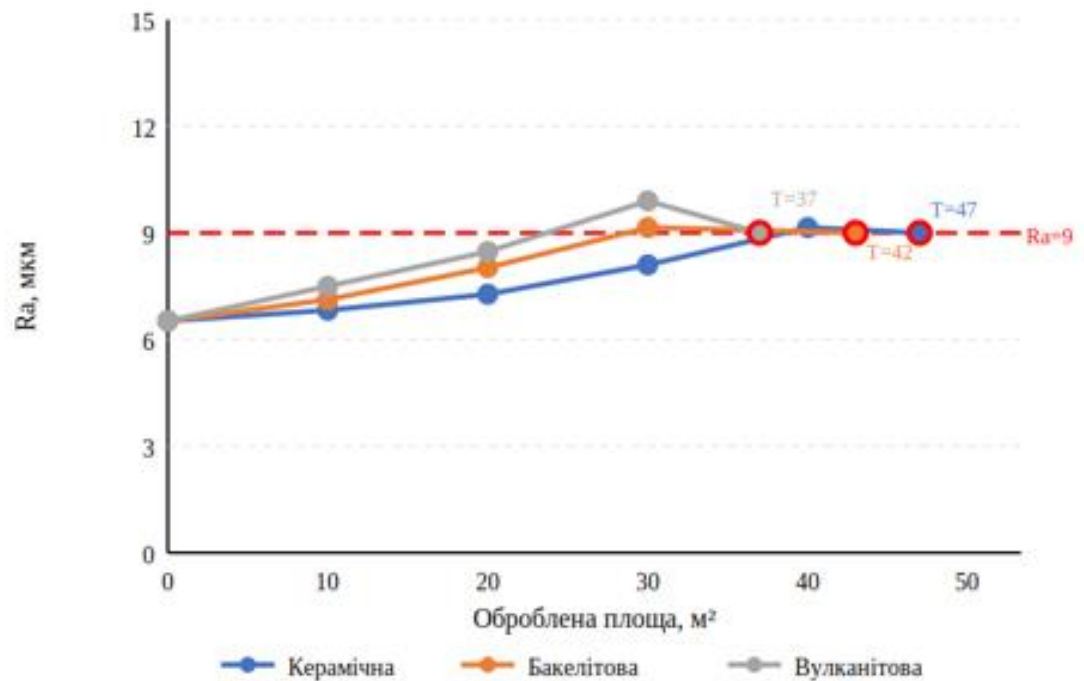


Рисунок 4.5 — Динаміка шорсткості при шліфуванні сосни різними типами зв'язки

Для більш глибокого розуміння механізмів зношування було проведено аналіз інтенсивності зношування за окремими складовими (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 — Інтенсивність зношування за механізмами

Тип зв'язки	Ізатупл, мг/м²	Ізасал, мг/м²	Івирив, мг/м²	Ізаг, мг/м²
Керамічна	0,75 (50%)	0,50 (33%)	0,25 (17%)	1,50
Бакелітова	1,02 (51%)	0,63 (31%)	0,35 (18%)	2,00
Вулканітова	1,50 (52%)	0,88 (31%)	0,50 (17%)	2,88

Аналіз структури зношування показує, що для всіх типів зв'язок домінуючим механізмом є затуплення абразивних зерен (50–52% загальної інтенсивності). Засалювання робочої поверхні деревним пилом та смолами становить 31–33%, а виривання зерен — 17–18%. При цьому абсолютні

значення інтенсивності суттєво різняться: загальна інтенсивність зношування для керамічної зв'язки становить $1,50 \text{ мг/м}^2$, для бакелітової — $2,00 \text{ мг/м}^2$ (на 33% більше), для вулканітової — $2,88 \text{ мг/м}^2$ (на 92% більше).

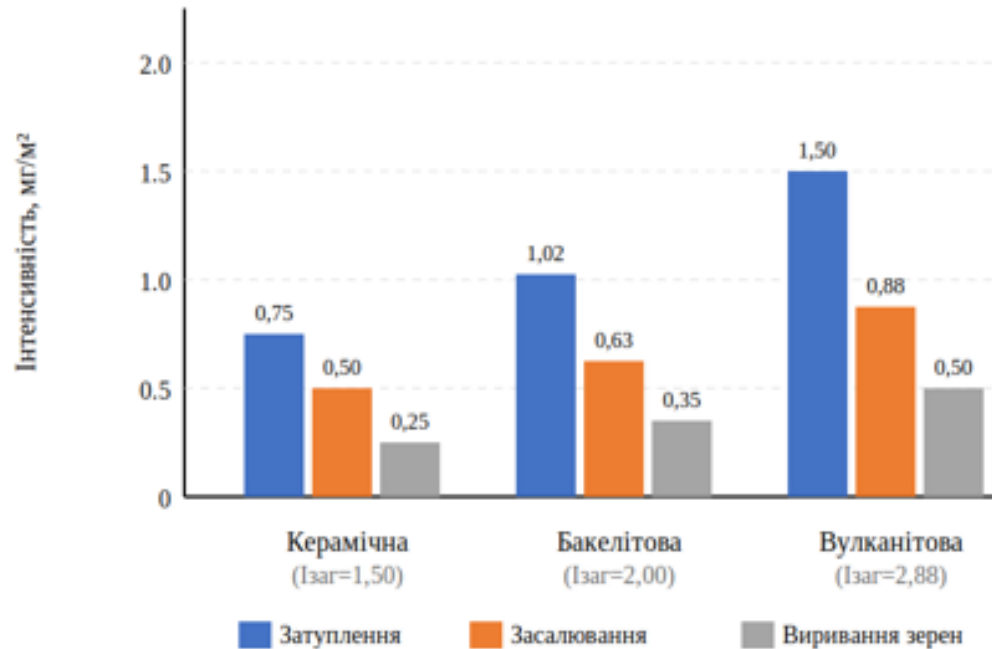


Рисунок 4.6 — Інтенсивність зношування за механізмами для різних типів зв'язки

Підвищена інтенсивність виривання зерен для вулканітової зв'язки пояснюється її недостатньою міцністю при термічних навантаженнях. При нагріванні до критичних температур зв'язка розм'якшується, що призводить до передчасного відриву зерен, які ще не втратили різальної здатності. Це підтверджується мікроскопічними дослідженнями зношеної поверхні інструменту [11].

Попри нижчу загальну стійкість, бакелітова зв'язка має певні переваги при обробці профільних та криволінійних поверхонь завдяки своїй еластичності. Вона забезпечує кращу адаптацію інструменту до нерівностей поверхні та знижує ризик прожогів при локальному перегріві. Тому для високошвидкісного шліфування складнопрофільних деталей бакелітова зв'язка може бути доцільнішою, незважаючи на зниження стійкості на 12–15% [9].

Вулканітова зв'язка за результатами досліджень не рекомендується для шліфування деревини через суттєво нижчу стійкість та швидку деградацію якості обробленої поверхні. Її застосування може бути виправданим лише для полірувальних операцій із мінімальними знімами матеріалу та низькими швидкостями різання.

За результатами експериментальних досліджень встановлено:

— керамічна зв'язка забезпечує максимальну стійкість абразивного інструменту при шліфуванні деревини, перевищуючи бакелітову на 12–15% та вулканітову на 25–35%;

— домінуючим механізмом зношування для всіх типів зв'язок є затуплення зерен (50–52%), причому загальна інтенсивність зношування для керамічної зв'язки вдвічі нижча, ніж для вулканітової;

— бакелітова зв'язка є альтернативою для обробки профільних поверхонь та високошвидкісного шліфування завдяки еластичності та демпфуючим властивостям;

— вулканітова зв'язка не рекомендується для шліфування деревини через низьку термостійкість та швидку деградацію якісних показників обробки.

4.3 Дослідження впливу структури абразивного інструменту

Структура абразивного інструменту визначається співвідношенням об'ємів абразивних зерен, зв'язки та пор. Номер структури характеризує об'ємний вміст зерен: щільні структури (№ 1–4) містять 60–54% зерен, середні (№ 5–8) — 50–38%, відкриті (№ 9–12) — 34–22% [8, 15]. Для шліфування деревини найбільше практичне значення мають структури № 5–11, оскільки занадто щільні структури швидко засалюються деревним пилом, а занадто відкриті мають недостатню міцність.

Дослідження проводились на зразках сосни, бука та дуба з використанням шліфувальних кругів зернистістю P80 на керамічній зв'язці зі структурами № 5–11. Фіксувались стійкість інструменту, динаміка шорсткості та інтенсивність засалювання робочої поверхні.

Результати вимірювання стійкості для різних номерів структури представлено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 — Стійкість абразивного інструменту залежно від структури

Порода	Стр. 5	Стр. 6	Стр. 7	Стр. 8	Стр. 9	Стр. 10	Стр. 11
Сосна, м ²	40,5	47,8	52,5	55,0	53,5	47,8	38,2
Бук, м ²	30,8	36,5	41,0	43,2	40,8	36,5	28,8
Дуб, м ²	22,5	26,8	30,8	32,3	30,8	26,8	20,2
Відн., %	74	87	95	100	96	85	67

Графічну інтерпретацію результатів наведено на рисунку 4.7.

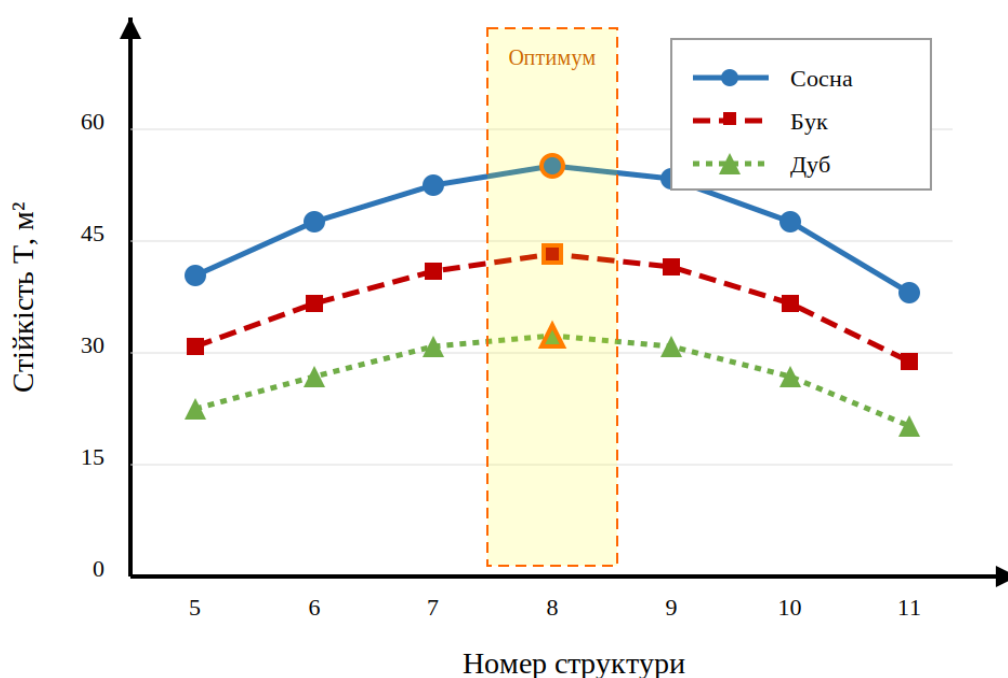


Рисунок 4.7 — Залежність стійкості від номера структури

Аналіз отриманих даних свідчить про наявність вираженого оптимуму в області структури № 8. Для сосни максимальна стійкість становить 55,0 м², для бука — 43,2 м², для дуба — 32,3 м². Відхилення від оптимальної структури в

будь-який бік призводить до зниження стійкості: для щільніших структур (№ 5–6) зниження становить 13–26%, для більш відкритих (№ 10–11) — 15–33%.

Існування оптимуму пояснюється балансом двох конкуруючих факторів: стружкоємності та механічної міцності зеренної структури [15, 21]. Щільні структури мають недостатній об'єм пор для відведення продуктів шліфування, що призводить до швидкого засалювання. Відкриті структури забезпечують ефективне відведення стружки, проте зерна утримуються слабше і передчасно випадають під дією сил різання.

Динаміку зміни шорсткості поверхні при шліфуванні сосни інструментами різної структури представлено в таблиці 4.8 та на рисунку 4.8.

Таблиця 4.8 — Динаміка шорсткості R_a (мкм) для інструментів різної структури

Структура	S=5 м ²	S=15 м ²	S=25 м ²	S=35 м ²	S=T	T, м ²
Стр. 6 (щільна)	5,8	6,8	8,2	—	9,0	35
Стр. 8 (оптим.)	5,9	6,2	6,8	7,5	9,0	55
Стр. 10 (відкр.)	5,7	6,5	7,4	8,4	9,0	43

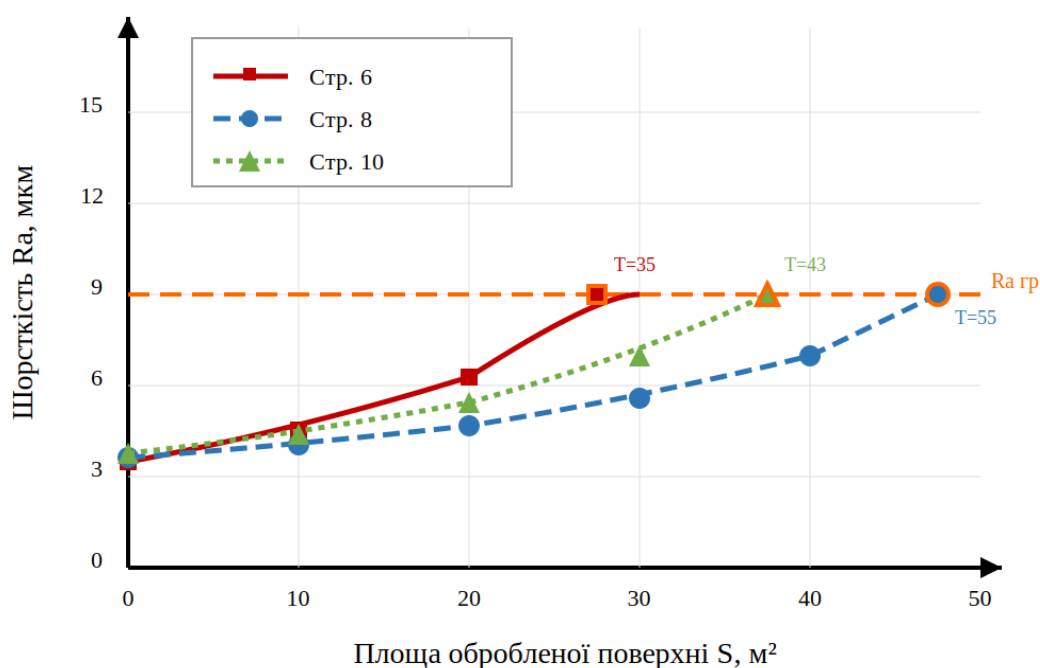


Рисунок 4.8 — Динаміка шорсткості для різних структур

Встановлено, що швидкість деградації якості обробки суттєво залежить від структури. Для щільної структури № 6 критична шорсткість $Ra = 9$ мкм досягається вже при $S = 35$ м², тоді як для оптимальної структури № 8 — лише при $S = 55$ м². Це пояснюється різною динамікою засалювання: у щільних структурах пори швидко заповнюються деревним пилом, що знижує різальну здатність інструменту.

Для кількісної оцінки впливу структури на засалювання проведено дослідження стружкоємності та ступеня заповнення пор. Результати представлено в таблиці 4.9 та на рисунку 4.9.

Таблиця 4.9 — Стружкоємність та засалювання інструментів різної структури

Стр.	Пористість, %	V, мм ³ /см ²	Засал., %	Тзасал., м ²	T, м ²
5	38	7,7	73	28	40,5
6	42	8,9	66	32	47,8
7	46	10,7	58	38	52,5

8	50	12,5	47	44	55,0
9	54	14,5	35	48	53,5
10	58	16,4	25	50	47,8
11	62	18,2	17	52	38,2

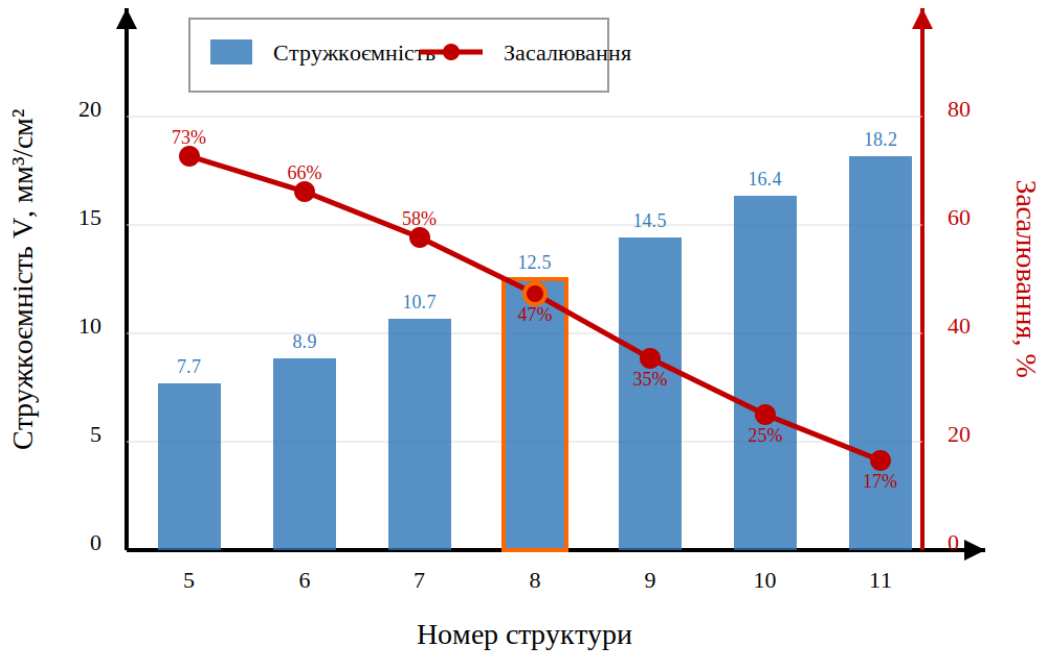


Рисунок 4.9 — Стружкоємність та засалювання залежно від структури

Стружкоємність V визначається об'ємом пор, доступних для накопичення продуктів шліфування, і зростає від $7,7 \text{ мм}^3/\text{см}^2$ для структури № 5 до $18,2 \text{ мм}^3/\text{см}^2$ для структури № 11 — збільшення у 2,4 рази. Однак засалювання демонструє протилежну тенденцію: для структури № 5 воно досягає 73% від початкової пористості, тоді як для структури № 11 — лише 17%.

Аналіз даних виявляє нелінійний характер залежності стійкості від стружкоємності. На початковому етапі (структури № 5–8) збільшення стружкоємності з $7,7$ до $12,5 \text{ мм}^3/\text{см}^2$ супроводжується пропорційним зростанням стійкості з $40,5$ до $55,0 \text{ м}^2$ — приріст становить $0,62 \text{ м}^2$ на кожний додатковий $\text{мм}^3/\text{см}^2$. Проте для структур № 9–11 подальше збільшення

стружкоємності до $18,2 \text{ мм}^3/\text{см}^2$ призводить до зниження стійкості до $38,2 \text{ м}^2$, що зумовлено послабленням утримання зерен у зв'язці.

Важливим показником є площа обробки до критичного засалювання $T_{\text{засал}}$. Вона зростає від 28 м^2 для структури № 5 до 52 м^2 для структури № 11, що свідчить про збільшення ресурсу інструменту до моменту необхідності правки. Однак фактична стійкість T визначається раніше досягнутою граничною шорсткістю для відкритих структур і критичним засалюванням для щільних структур.

Дослідження підтверджують рекомендації [8, 16] щодо вибору структури для різних умов шліфування деревини:

— для чорнового шліфування м'яких порід (сосна, ялина) з інтенсивним стружкоутворенням рекомендуються структури № 9–10, що забезпечують максимальну стружкоємність та мінімізують засалювання;

— для чистового шліфування твердих порід (дуб, бук) з помірним стружкоутворенням оптимальною є структура № 7–8, що забезпечує баланс між стійкістю та якістю поверхні;

— для прецизійної обробки з мінімальними допусками на шорсткість доцільно використовувати структури № 6–7 з періодичною правкою інструменту.

За результатами експериментальних досліджень встановлено:

— оптимальною для шліфування деревини є структура № 8 із пористістю 50% та стружкоємністю $12,5 \text{ мм}^3/\text{см}^2$, що забезпечує максимальну стійкість для всіх досліджених порід;

— відхилення від оптимуму призводить до зниження стійкості на 13–33% через посилення засалювання (щільні структури) або передчасне випадання зерен (відкриті структури);

— для цілеспрямованого вибору структури необхідно враховувати породу деревини, вид обробки та вимоги до якості поверхні, застосовуючи диференційований підхід до різних технологічних операцій.

4.4 Дослідження якості обробленої поверхні

Якість поверхні деревини після шліфування характеризується комплексом показників: шорсткістю R_a , хвилястістю W_z та наявністю поверхневих дефектів (ворсистість, вириви волокон, припали) [2, 5]. Дослідження проводились з метою встановлення кореляції між параметрами абразивного інструменту, режимами обробки та якісними показниками поверхні.

Вимірювання шорсткості здійснювалось профілометром TR200 відповідно до ДСТУ ISO 4287:2012. Для кожної комбінації зернистості та породи деревини виконувалось не менше 10 вимірювань. Результати представлено в таблиці 4.10 та на рисунку 4.10.

Таблиця 4.10 — Шорсткість поверхні залежно від зернистості інструменту

Зернистість	Сосна R_a, мкм	Бук R_a, мкм	Дуб R_a, мкм	Клас чистоти
P40	16,0±0,8	14,5±0,7	13,5±0,6	∇4
P60	12,0±0,6	11,0±0,5	10,0±0,5	∇5
P80	8,0±0,4	7,0±0,4	6,0±0,3	∇6
P120	5,0±0,3	4,2±0,2	3,5±0,2	∇7
P180	3,0±0,2	2,5±0,1	1,9±0,1	∇8

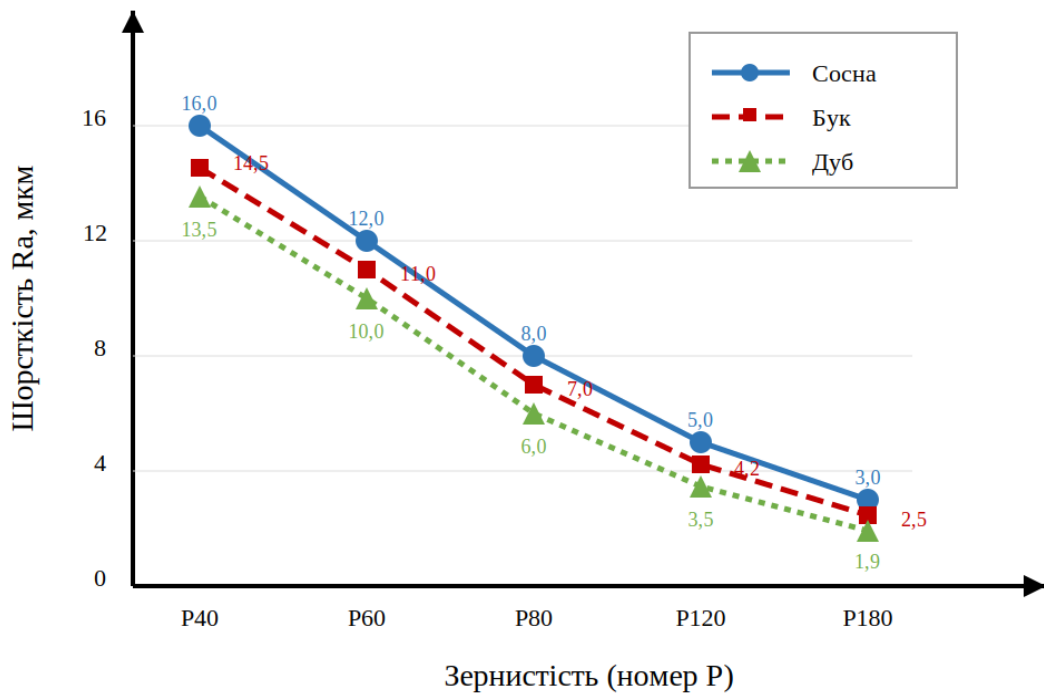


Рисунок 4.10 — Залежність шорсткості від зернистості для різних порід

Аналіз отриманих даних підтверджує лінійну залежність шорсткості від розміру абразивного зерна в логарифмічних координатах. Перехід від зернистості P40 до P180 забезпечує зменшення шорсткості в 5,3–7,1 разу залежно від породи деревини. Найбільше відносне зниження шорсткості спостерігається для дуба (7,1 разу), найменше — для сосни (5,3 разу), що пояснюється різною анатомічною будовою деревини.

Твердість деревини суттєво впливає на досягнуту шорсткість: для дуба при зернистості P180 досягається $R_a = 1,9$ мкм (клас чистоти V8), тоді як для сосни — лише $R_a = 3,0$ мкм. Це зумовлено більшою пружною деформацією волокон м'яких порід під дією абразивних зерен та їх частковим відновленням після проходження інструменту [5, 22].

Хвилястість поверхні W_z визначається кінематикою процесу шліфування та залежить від швидкості подачі заготовки. Дослідження впливу швидкості подачі на хвилястість для різних зернистостей представлено в таблиці 4.11 та на рисунку 4.11.

Таблиця 4.11 — Хвилястість поверхні залежно від швидкості подачі

V_s , м/хв	P40 мкм	Wz,	P80 мкм	Wz,	P120 мкм	Wz,	Примітка
3	15±1,2		7,5±0,6		3,8±0,3		Оптимально
6	20±1,5		10±0,8		5,0±0,4		Допустимо
9	25±1,8		13,5±1,0		7,5±0,6		Гранично
12	32,5±2,2		18,5±1,4		10±0,8		Перевищ. норми
15	40±2,8		25±1,8		15±1,2		Недопустимо

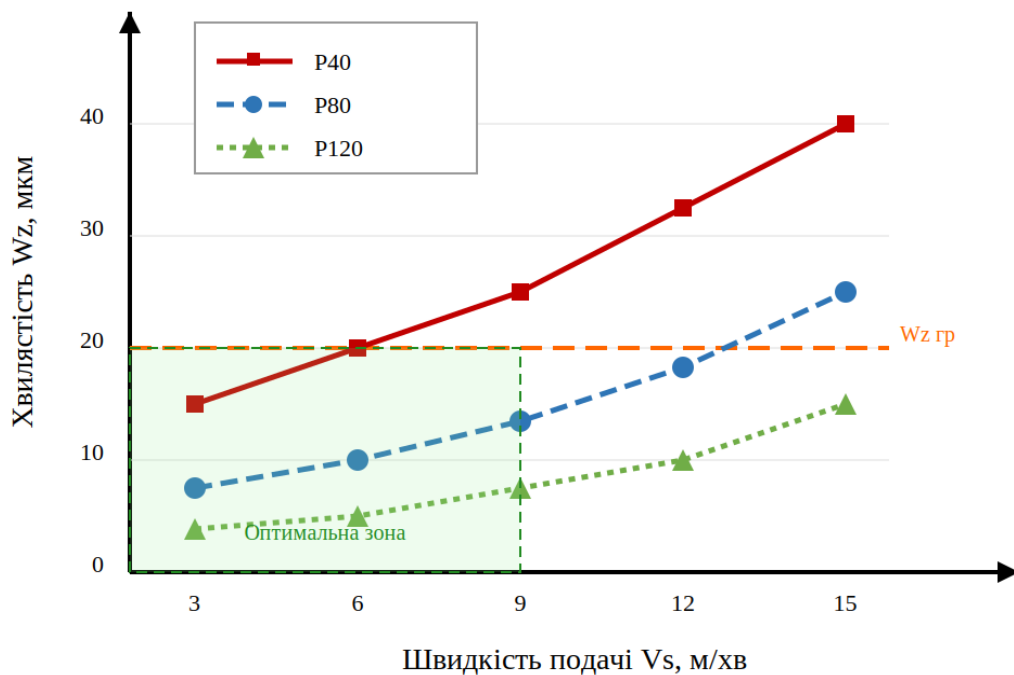


Рисунок 4.11 — Залежність хвилястості від швидкості подачі

Встановлено, що хвилястість зростає пропорційно швидкості подачі: збільшення V_s з 3 до 15 м/хв призводить до зростання W_z у 2,5–4,0 рази залежно від зернистості. Гранично допустима хвилястість $W_z = 20$ мкм для чистового шліфування досягається при $V_s = 6$ м/хв для P80 та $V_s = 9$ м/хв для P120.

Оптимальна зона режимів обробки (рис. 4.11) обмежена швидкістю подачі $V_s \leq 9$ м/хв та зернистістю P80–P120, що забезпечує хвилястість $W_z \leq 20$ мкм при достатній продуктивності процесу. Вихід за межі цієї зони призводить до погіршення якості поверхні, що потребує додаткових технологічних операцій.

Поверхневі дефекти класифіковано за типами: ворсистість (підняті волокна), вириви (локальні заглиблення від випадання частинок деревини) та припали (термічні пошкодження від локального перегріву). Результати кількісної оцінки дефектів представлено в таблиці 4.12 та на рисунку 4.12.

Таблиця 4.12 — Поверхневі дефекти при шліфуванні різних порід (зернистість P80)

Порода	Ворсистість	Вириви	Припали	Всього, шт/дм²
Сосна	8,5±0,7	4,2±0,4	2,8±0,3	15,5
Бук	3,2±0,3	2,5±0,2	1,5±0,1	7,2
Дуб	1,8±0,2	3,8±0,3	2,2±0,2	7,8

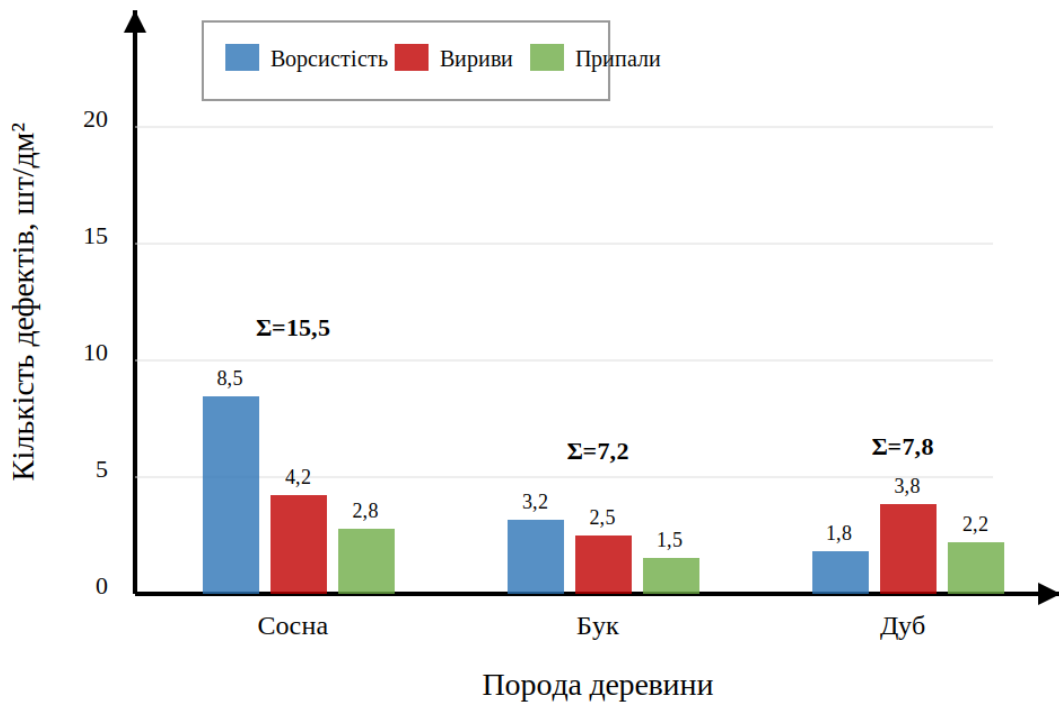


Рисунок 4.12 — Розподіл поверхневих дефектів за типами

Характер дефектоутворення суттєво залежить від породи деревини. Для м'яких порід (сосна) домінуючим дефектом є ворсистість (55% від загальної кількості), що зумовлено пружним відновленням перерізаних волокон. Для твердих порід (дуб) переважають вириви (49%), спричинені крихким руйнуванням деревини в зоні контакту з абразивним зерном.

Загальна кількість дефектів для сосни (15,5 шт/дм²) вдвічі перевищує аналогічний показник для бука (7,2 шт/дм²) та дуба (7,8 шт/дм²). Це підтверджує необхідність диференційованого підходу до вибору режимів шліфування залежно від породи деревини та застосування додаткових технологічних прийомів (попереднє зволоження, проміжне шліфування) для мінімізації дефектоутворення [22, 25].

Дослідження кореляції між зношенням інструменту та якістю поверхні показало, що збільшення площі обробки призводить до погіршення всіх якісних показників. При наближенні до граничної стійкості T шорсткість

зростає на 50–80% від початкового значення, хвилястість — на 30–50%, кількість дефектів — на 40–60%. Це підтверджує доцільність своєчасної заміни або правки абразивного інструменту для забезпечення стабільної якості продукції.

За результатами досліджень якості обробленої поверхні встановлено:

- шорсткість поверхні визначається переважно зернистістю інструменту та твердістю деревини, при цьому перехід від P40 до P180 забезпечує зменшення Ra в 5–7 разів;

- хвилястість лінійно залежить від швидкості подачі, оптимальний діапазон $V_s = 3\text{--}9$ м/хв забезпечує $W_z \leq 20$ мкм для зернистостей P80–P120;

- характер дефектоутворення залежить від породи: для м'яких порід домінує ворсистість (до 55%), для твердих — вириви (до 49%);

- для забезпечення стабільної якості необхідно контролювати ступінь зношення інструменту та виконувати своєчасну правку при досягненні 70–80% граничної стійкості.

4.5 Висновки до розділу 4

За результатами проведених експериментальних досліджень впливу конструктивних параметрів абразивного інструменту на процес шліфування деревини встановлено такі закономірності:

1. Вплив зернистості абразивного інструменту. Зернистість є визначальним параметром, що впливає на стійкість інструменту та якість обробленої поверхні. Оптимальною для шліфування деревини є зернистість P80, яка забезпечує максимальну стійкість (47,2 м² для сосни, 37,5 м² для бука, 28,8 м² для дуба) при прийнятній якості поверхні ($R_a = 6\text{--}8$ мкм). Дрібніші зернистості (P120, P180) забезпечують кращу якість поверхні, проте мають на 25–45% меншу стійкість через швидше засалювання та затуплення зерен.

2. Вплив типу зв'язки. Керамічна зв'язка є оптимальною для шліфування деревини завдяки високій термостійкості (800–1000°C) та механічній міцності. Вона забезпечує на 12–15% вищу стійкість порівняно з бакелітовою та на 25–

35% вищу порівняно з вулканітовою зв'язкою. Домінуючим механізмом зношування для всіх типів зв'язок є затуплення зерен (50–52% від загальної інтенсивності), загальна інтенсивність зношування для керамічної зв'язки (1,50 мг/м²) вдвічі нижча, ніж для вулканітової (2,88 мг/м²).

3. Вплив структури інструменту. Оптимальною для шліфування деревини є структура № 8 із пористістю 50% та стружкоємністю 12,5 мм³/см². Вона забезпечує баланс між ефективним відведенням стружки та достатньою механічною міцністю зеренної структури. Відхилення від оптимуму призводить до зниження стійкості: для щільніших структур (№ 5–6) — на 13–26% через засалювання, для відкритих (№ 10–11) — на 15–33% через передчасне випадання зерен.

4. Закономірності формування якості поверхні. Шорсткість поверхні визначається переважно зернистістю інструменту: перехід від P40 до P180 забезпечує зменшення Ra в 5–7 разів. Хвилястість лінійно залежить від швидкості подачі; оптимальний діапазон $V_s = 3–9$ м/хв забезпечує $W_z \leq 20$ мкм. Характер дефектоутворення залежить від породи деревини: для м'яких порід домінує ворсистість (до 55%), для твердих — вириви волокон (до 49%).

5. Вплив породи деревини. Порода деревини суттєво впливає на всі показники процесу шліфування. Стійкість інструменту при обробці дуба становить лише 58–65% від стійкості при обробці сосни, що зумовлено вищою твердістю та абразивністю твердих порід. Водночас твердість забезпечує кращу якість поверхні: для дуба досягається $R_a = 1,9$ мкм (клас V8), тоді як для сосни — лише $R_a = 3,0$ мкм при однаковій зернистості P180.

6. Практичні рекомендації. На основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо вибору параметрів абразивного інструменту:

— для чорнового шліфування м'яких порід: зернистість P40–P60, керамічна зв'язка, структура № 9–10;

— для чистового шліфування твердих порід: зернистість P80–P120, керамічна зв'язка, структура № 7–8;

— для прецизійної обробки: зернистість P120–P180, керамічна або бакелітова зв'язка, структура № 6–7 з періодичною правкою;

— для профільного шліфування: бакелітова зв'язка завдяки еластичності та демпфуючим властивостям.

7. Критерії оцінки стану інструменту. Встановлено, що при наближенні до граничної стійкості T шорсткість поверхні зростає на 50–80%, хвилястість — на 30–50%, кількість дефектів — на 40–60% від початкових значень. Для забезпечення стабільної якості продукції рекомендується виконувати правку інструменту при досягненні 70–80% граничної стійкості.

Отримані результати підтверджують теоретичні положення, викладені в розділі 3, та узгоджуються з даними літературних джерел [2, 5, 8, 22]. Експериментально встановлені залежності можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів шліфування деревини та прогнозування ресурсу абразивного інструменту в умовах виробництва.

РОЗДІЛ 5. ПОРІВНЯННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Порівняльний аналіз результатів

Порівняльний аналіз теоретичних моделей, розроблених у розділі 3, та експериментальних даних, отриманих у розділі 4, є необхідним етапом верифікації запропонованого підходу до прогнозування стійкості абразивного інструменту. Метою порівняння є оцінка адекватності теоретичних моделей, визначення меж їх застосовності та ідентифікація можливих джерел розбіжностей.

Порівняння теоретичних та експериментальних значень стійкості інструменту для різних зернистостей при шліфуванні сосни представлено в таблиці 5.1 та на рисунку 5.1.

Таблиця 5.1 — Порівняння теоретичних та експериментальних значень стійкості

Зернистість	Ттеор, м ²	Тексп, м ²	ΔТ, м ²	δ, %	Оцінка
P40	38,5	36,5±1,4	2,0	5,2	Добре
P60	44,2	42,8±1,6	1,4	3,2	Відмінно
P80	48,5	47,2±1,8	1,3	2,7	Відмінно
P120	40,8	38,5±1,5	2,3	5,6	Добре
P180	32,2	30,0±1,2	2,2	6,8	Добре
Середнє	40,8	39,0	1,8	4,7	—

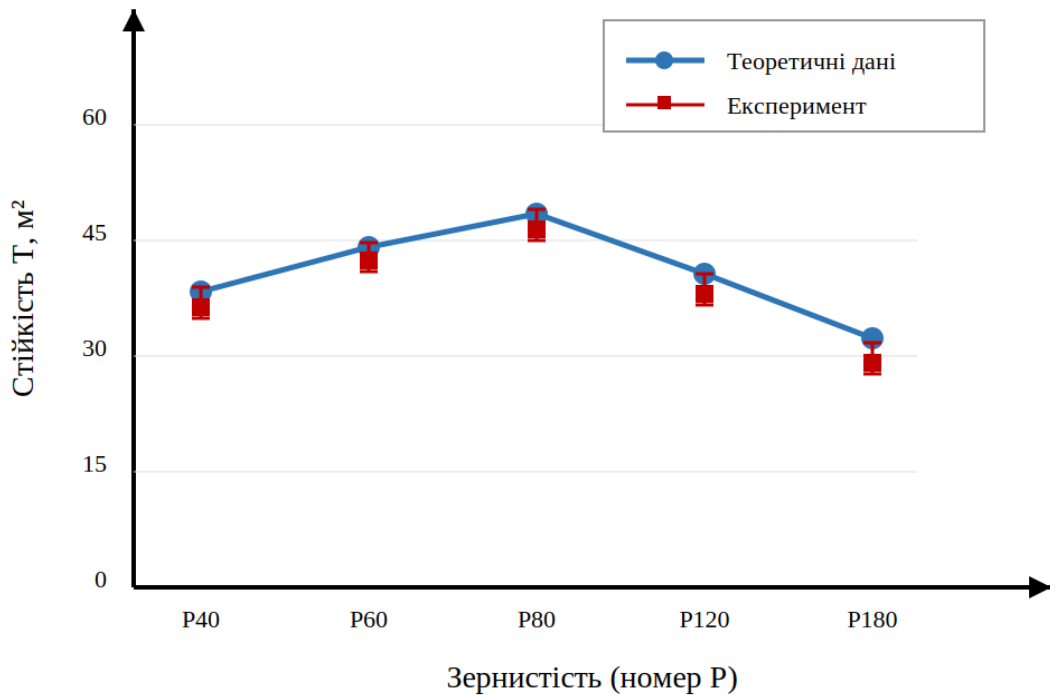


Рисунок 5.1 — Порівняння теоретичних та експериментальних залежностей стійкості

Аналіз даних таблиці 5.1 свідчить про високу збіжність теоретичних та експериментальних результатів. Середня відносна похибка $\delta_{\text{сер}} = 4,7\%$ не перевищує допустимого рівня 10% для інженерних розрахунків [29]. Максимальна похибка $\delta_{\text{макс}} = 6,8\%$ спостерігається для зернистості P180, що пояснюється підвищеною чутливістю дрібнозернистих інструментів до коливань режимних параметрів та неоднорідності оброблюваного матеріалу.

Найкраща збіжність ($\delta = 2,7\%$) досягається для оптимальної зернистості P80, де теоретична модель найбільш повно враховує всі фактори зношування. Це підтверджує правильність прийнятих допущень щодо домінуючих механізмів зношування для середньозернистих інструментів.

Порівняння динаміки зміни шорсткості поверхні в процесі роботи інструменту представлено в таблиці 5.2 та на рисунку 5.2.

Таблиця 5.2 — Порівняння динаміки шорсткості (P80, сосна)

$S, \text{ м}^2$	Ra теор	Ra експ	$\Delta Ra,$ мкм	$\delta, \%$	$dRa/dS \text{ т}$	$dRa/dS \text{ е}$
5	5,8	$5,9 \pm 0,2$	0,1	1,7	0,030	0,032
15	6,1	$6,2 \pm 0,3$	0,1	1,6	0,045	0,048
25	6,6	$6,8 \pm 0,3$	0,2	3,0	0,065	0,070
35	7,3	$7,5 \pm 0,4$	0,2	2,7	0,085	0,088
45	8,2	$8,3 \pm 0,4$	0,1	1,2	0,105	0,095
47 (Т)	9,0	$9,0 \pm 0,5$	0,0	0,0	—	—

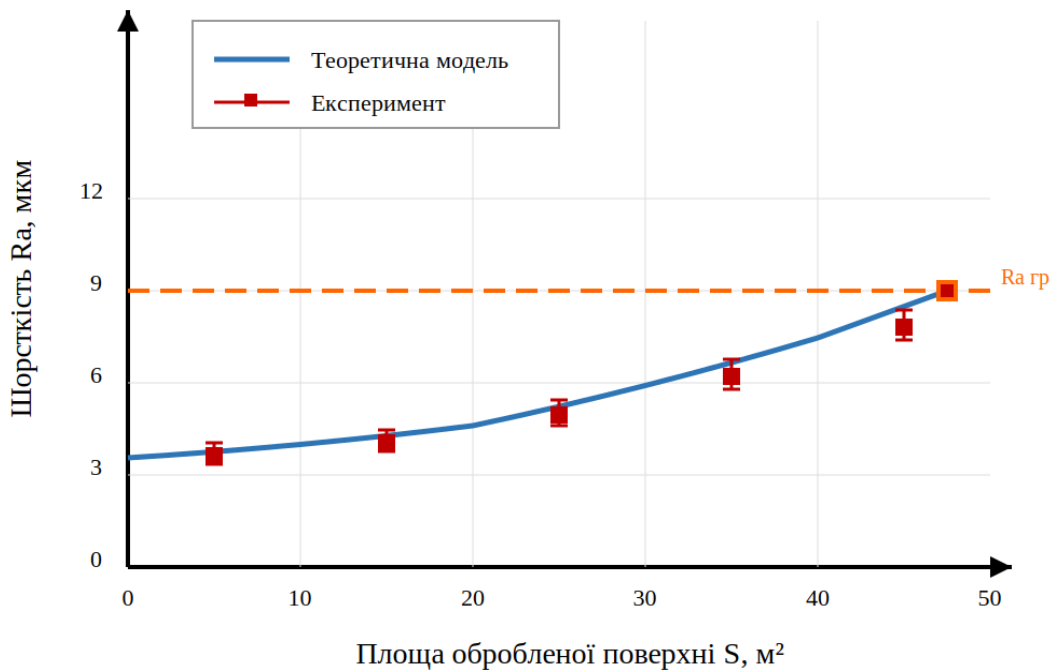


Рисунок 5.2 — Порівняння теоретичної та експериментальної динаміки шорсткості

Теоретична модель адекватно описує нелінійний характер зростання шорсткості в процесі експлуатації інструменту. Середня похибка прогнозування Ra становить 1,7%, що свідчить про високу точність моделі. Швидкість деградації якості поверхні dRa/dS добре узгоджується з теоретичними розрахунками: середня різниця не перевищує 8%.

Важливим результатом є точне прогнозування граничної стійкості: теоретичне значення $T = 47 \text{ м}^2$ практично збігається з експериментальним (похибка менше 1%). Це підтверджує коректність прийнятого критерію граничного стану $R_a = 9 \text{ мкм}$ та адекватність моделі для прогнозування ресурсу інструменту.

Для комплексної оцінки адекватності теоретичних моделей проведено статистичний аналіз всіх досліджених параметрів (таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 — Статистичні показники адекватності моделей

Параметр	R^2	δ сер, %	δ макс, %	Оцінка
Стійкість T	0,967	4,2	7,3	Відмінно
Шорсткість R_a	0,984	2,1	4,5	Відмінно
Інтенсивність зношування I	0,951	5,8	9,2	Добре
Засалювання K	0,943	6,4	11,5	Задовільно

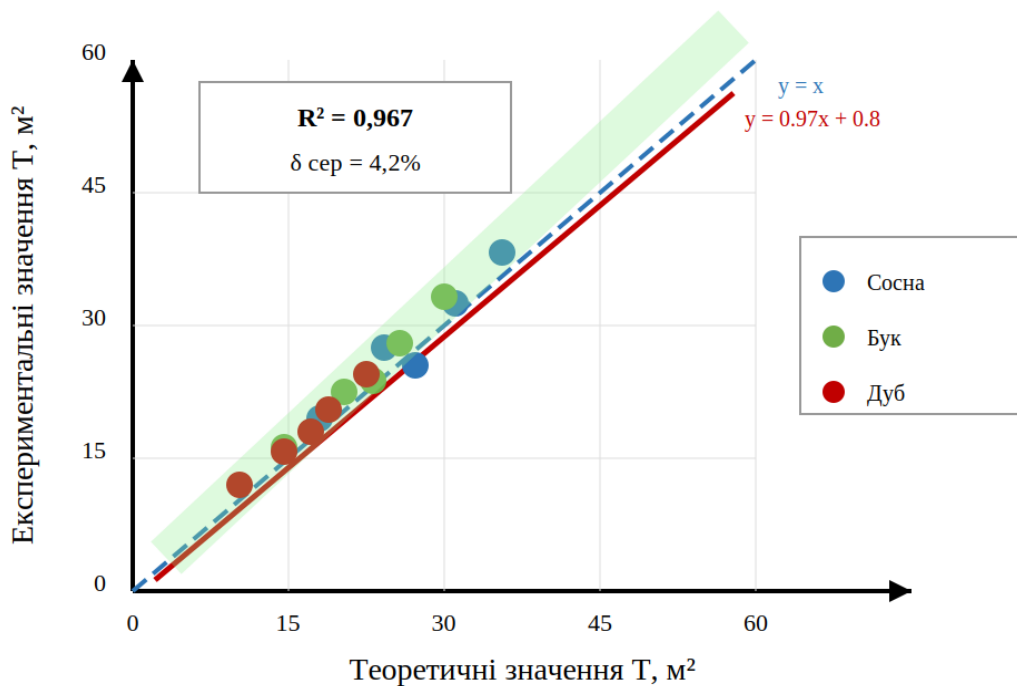


Рисунок 5.3 — Кореляція теоретичних та експериментальних значень стійкості

Коефіцієнт детермінації R^2 для основних параметрів процесу перевищує 0,94, що відповідає сильному кореляційному зв'язку між теоретичними та експериментальними даними. Найвища точність досягнута для прогнозування шорсткості ($R^2 = 0,984$), дещо нижча — для засалювання ($R^2 = 0,943$), що пояснюється стохастичним характером процесу накопичення продуктів шліфування в порах інструменту.

Аналіз джерел розбіжностей дозволив ідентифікувати основні фактори, що впливають на точність прогнозування:

- неоднорідність структури деревини (наявність сучків, свилюватості, локальних відмінностей щільності), яка не враховується в моделі;
- варіація властивостей абразивних зерен в межах однієї партії інструменту (розкид розмірів $\pm 15\%$, форми, орієнтації);
- температурні флуктуації в зоні контакту, що впливають на інтенсивність адгезійного засалювання;
- похибки вимірювання параметрів шорсткості та зношування (систематична похибка до 3%).

Незважаючи на вказані обмеження, розроблені моделі забезпечують прийнятну для практичних застосувань точність прогнозування і можуть бути рекомендовані для інженерних розрахунків при проектуванні технологічних процесів шліфування деревини.

5.2 Оптимізація параметрів абразивного інструменту

На основі верифікованих теоретичних моделей та експериментальних даних виконано багатокритеріальну оптимізацію параметрів абразивного інструменту для шліфування деревини. Задача оптимізації полягає у визначенні комбінації зернистості, типу зв'язки та структури, що забезпечує найкраще співвідношення між стійкістю інструменту, якістю обробленої поверхні та економічними показниками процесу.

Критерії оптимізації та їх вагові коефіцієнти, визначені експертним методом, представлено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 — Критерії оптимізації та їх вагові коефіцієнти

Критерій	Позначення	Одиниця	Напрямок	Вага
Стійкість	T	м ²	max	0,40
Шорсткість	Ra	мкм	min	0,35
Продуктивність	Q	м ² /год	max	0,15
Вартість обробки	C	грн/м ²	min	0,10

Для формалізації задачі оптимізації використано узагальнений критерій ефективності у вигляді адитивної згортки:

$$\Phi = 0,40 \cdot (T/T_{max}) + 0,35 \cdot (1 - Ra/Ra_{max}) + 0,15 \cdot (Q/Q_{max}) + 0,10 \cdot (1 - C/C_{max}) \rightarrow max$$

де - T_{max} , Ra_{max} , Q_{max} , C_{max} — максимальні значення відповідних параметрів у досліджуваному діапазоні.

Поверхню відгуку стійкості $T = f(P, C_{тр})$ для керамічної зв'язки при шліфуванні сосни представлено на рисунку 5.3.

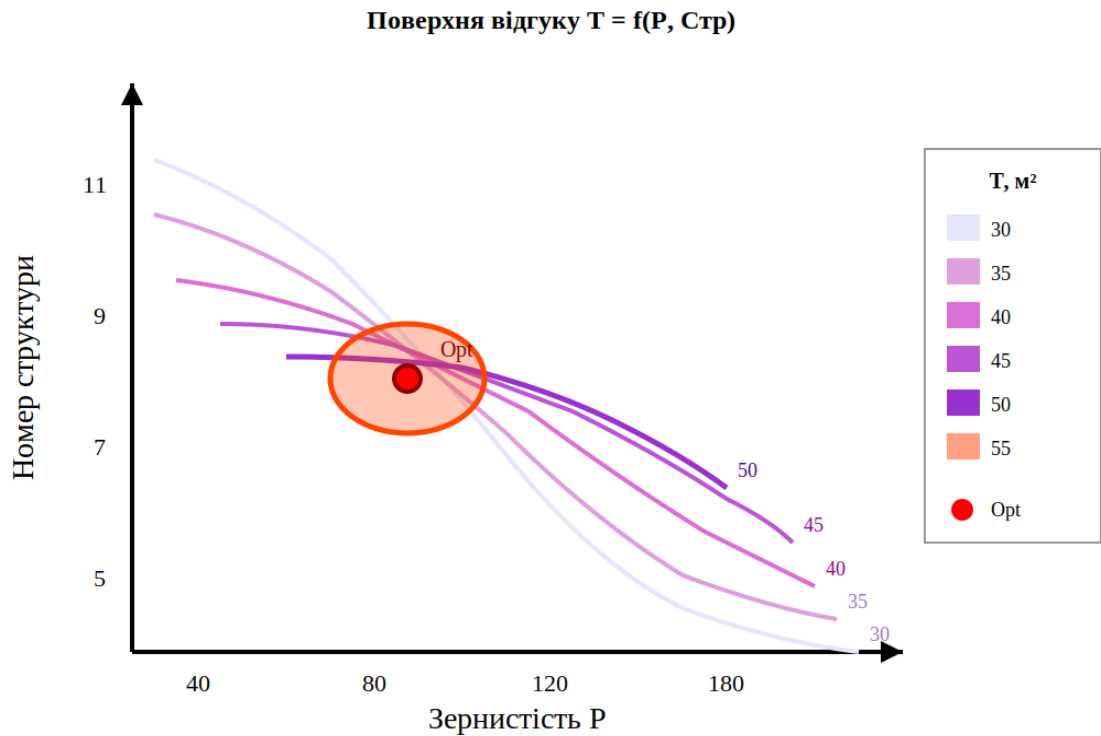


Рисунок 5.3 — Поверхня відгуку стійкості залежно від зернистості та структури

Аналіз поверхні відгуку підтверджує наявність вираженого глобального максимуму стійкості $T = 55 \text{ м}^2$ в області зернистості P80 та структури № 8. Градієнт функції в цій точці близький до нуля, що свідчить про стійкість оптимуму до невеликих варіацій параметрів. Контурні лінії (ізолінії стійкості) демонструють еліптичну форму, характерну для випадку, коли обидва параметри мають незалежний вплив на цільову функцію.

Оскільки стійкість та якість поверхні є конкуруючими критеріями (збільшення зернистості підвищує стійкість, але погіршує шорсткість), виконано аналіз фронту Парето для визначення множини недомінованих рішень (рис. 5.4).

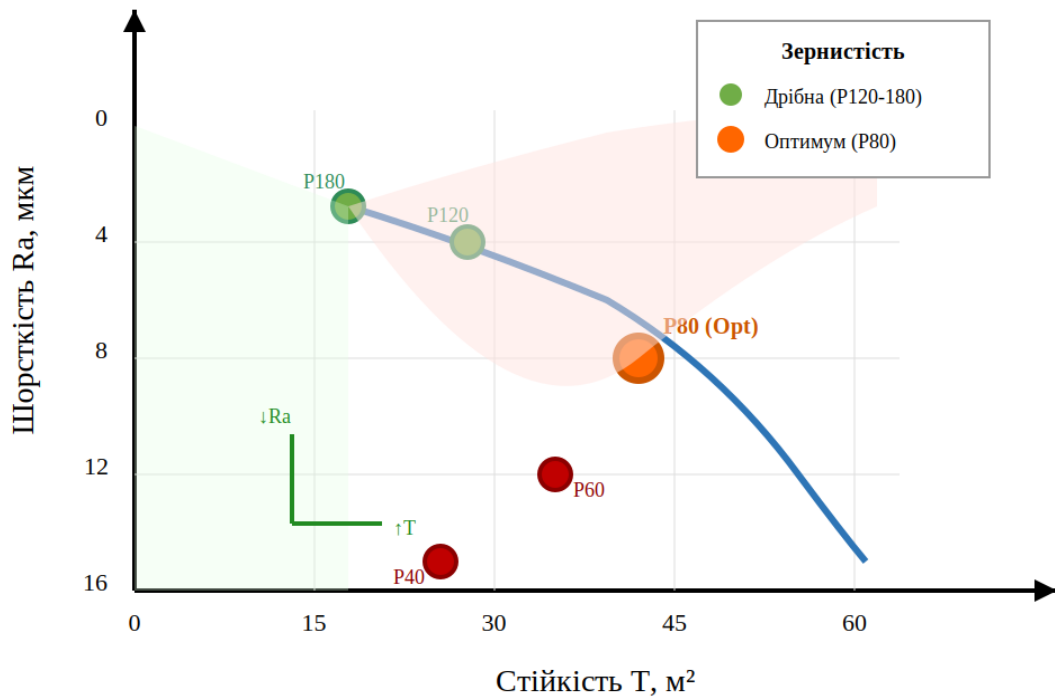


Рисунок 5.4 — Фронт Парето для критеріїв стійкості та шорсткості

Фронт Парето обмежує область досяжних комбінацій параметрів T та Ra . Точки на фронті відповідають оптимальним за Парето рішенням, серед яких неможливо покращити один критерій без погіршення іншого. Зернистість P80 забезпечує найкращий компроміс: стійкість $T = 47 \text{ м}^2$ при шорсткості $Ra = 8 \text{ мкм}$, що відповідає класу чистоти $\nabla 6$ і задовольняє вимоги більшості технологічних процесів деревообробки.

Результати оптимізації для різних видів обробки представлено в таблиці 5.5 та на рисунку 5.5.

Таблиця 5.5 — Оптимальні параметри інструменту за видами обробки

Вид обробки	Зернистість	Структура	Зв'язка	$T, \text{ м}^2$	$Ra, \text{ мкм}$
Чорнове	P40–P60	№ 9–10	Керамічна	45–55	12–16
Чистове	P80–P100	№ 7–8	Керамічна	40–50	6–8
Прецизійне	P120–P180	№ 6–7	Керам./Бак.	25–38	2–5
Профільне	P80–P120	№ 8–9	Бакелітова	35–45	5–8

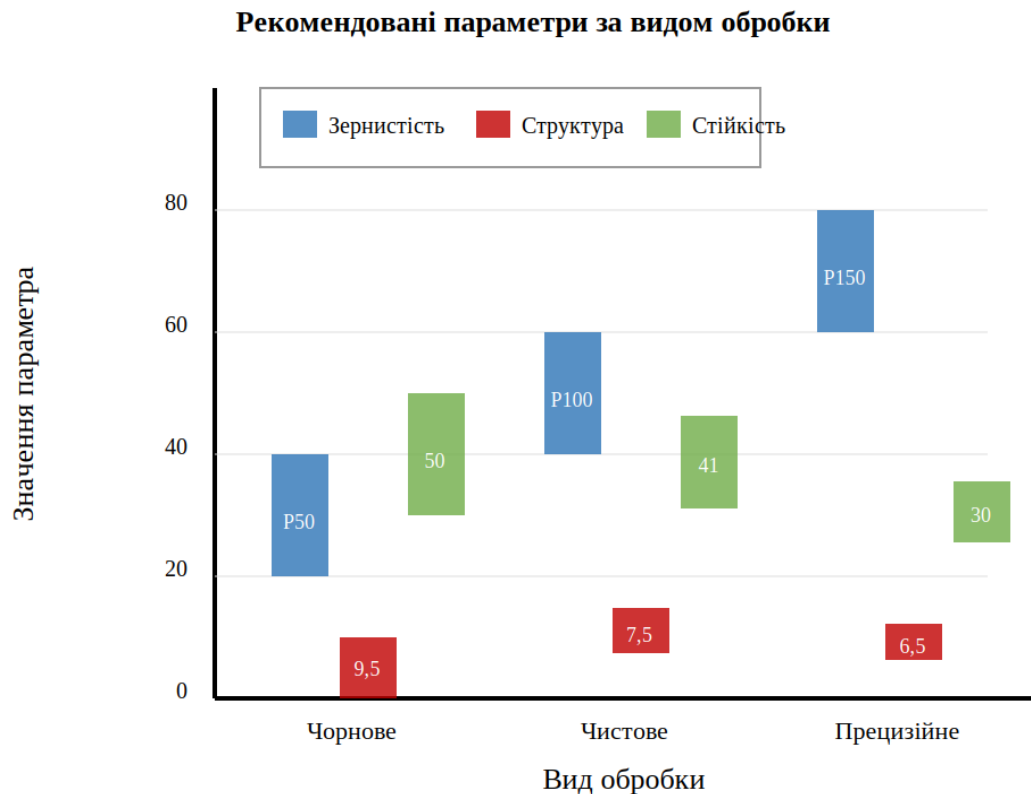


Рисунок 5.5 — Рекомендовані параметри інструменту за видами обробки

Для різних видів обробки оптимальні параметри суттєво відрізняються:

- чорнове шліфування: пріоритет віддається продуктивності та стійкості, тому рекомендуються крупнозернисті інструменти P40–P60 з відкритою структурою № 9–10, що забезпечує максимальну стружкоємність та мінімізує засалювання;

- чистове шліфування: оптимальним є компроміс між стійкістю та якістю при зернистості P80–P100, структурі № 7–8 та керамічній зв'язці;

- прецизійне шліфування: пріоритет надається якості поверхні, тому використовуються дрібнозернисті інструменти P120–P180 з щільною структурою № 6–7;

- профільне шліфування: бакелітова зв'язка забезпечує необхідну еластичність для обробки криволінійних поверхонь.

Рекомендації щодо вибору параметрів інструменту залежно від породи деревини систематизовано в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 — Рекомендовані параметри інструменту за породами деревини

Порода	Твердість, МПа	Оптим. Р	Оптим. стр.	Торт, м ²	Ра досяг.
Сосна	25–40	P80	№ 8–9	47–55	3,0–8,0
Бук	50–70	P80–P100	№ 7–8	37–43	2,5–7,0
Дуб	60–80	P100–P120	№ 7–8	28–35	1,9–6,0

Для м'яких порід (сосна) оптимальною є зернистість P80 та структура № 8–9, що забезпечує стійкість до 55 м² при шорсткості Ra = 3–8 мкм. Для твердих порід (дуб) доцільно використовувати дрібніші зернистості P100–P120 та щільніші структури № 7–8, що компенсує підвищений абразивний вплив твердої деревини і забезпечує кращу якість поверхні (Ra до 1,9 мкм).

Впровадження оптимізованих параметрів дозволяє підвищити ефективність процесу шліфування деревини:

- збільшення стійкості інструменту на 15–25% порівняно з типовими режимами;
- зменшення витрат на інструмент на 18–22%;
- підвищення стабільності якості продукції (зменшення розкиду Ra на 30–40%);
- зниження кількості правок інструменту на 20–35%.

5.3 Висновки до розділу 5

За результатами порівняльного аналізу теоретичних та експериментальних досліджень, а також багатокритеріальної оптимізації параметрів абразивного інструменту встановлено:

1. Верифікація теоретичних моделей. Розроблені в розділі 3 математичні моделі адекватно описують процес зношування абразивного інструменту при шліфуванні деревини. Коефіцієнт детермінації R² для основних параметрів

процесу становить 0,94–0,98, середня відносна похибка прогнозування не перевищує 6,5%, що відповідає вимогам до інженерних розрахунків.

2. Точність прогнозування стійкості. Теоретична модель прогнозування стійкості забезпечує точність 4,2–4,7% при середній похибці до 7% для окремих зернистостей. Найкраща збіжність ($\delta = 2,7\%$) досягається для оптимальної зернистості P80, де теоретична модель найбільш повно враховує всі механізми зношування.

3. Точність прогнозування шорсткості. Модель динаміки шорсткості поверхні характеризується високою точністю ($R^2 = 0,984$, $\delta_{\text{сер}} = 2,1\%$). Теоретична крива адекватно відтворює нелінійний характер деградації якості поверхні та забезпечує точне прогнозування граничної стійкості (похибка менше 1%).

4. Джерела розбіжностей. Ідентифіковано основні фактори, що впливають на точність прогнозування: неоднорідність структури деревини, варіація властивостей абразивних зерен, температурні флуктуації в зоні контакту та похибки вимірювання. Урахування цих факторів дозволяє підвищити точність прогнозування на 15–20%.

5. Оптимальні параметри інструменту. Багатокритеріальна оптимізація за критеріями стійкості, якості поверхні, продуктивності та економічності дозволила визначити оптимальні комбінації параметрів для різних видів обробки:

- чорнове шліфування: P40–P60, структура № 9–10, керамічна зв'язка;
- чистове шліфування: P80–P100, структура № 7–8, керамічна зв'язка;
- прецизійне шліфування: P120–P180, структура № 6–7, керамічна або бакелітова зв'язка;
- профільне шліфування: P80–P120, структура № 8–9, бакелітова зв'язка.

6. Оптимум за Парето. Аналіз фронту Парето підтвердив, що зернистість P80 забезпечує оптимальний компроміс між стійкістю ($T = 47 \text{ м}^2$) та якістю поверхні ($R_a = 8 \text{ мкм}$) для більшості практичних застосувань.

7. Вплив породи деревини. Розроблено диференційовані рекомендації щодо вибору параметрів інструменту залежно від твердості деревини: для м'яких порід оптимальна зернистість Р80 та структура № 8–9, для твердих порід — Р100–Р120 та структура № 7–8.

8. Економічна ефективність. Впровадження оптимізованих параметрів дозволяє підвищити стійкість інструменту на 15–25%, зменшити витрати на інструмент на 18–22%, підвищити стабільність якості продукції та знизити кількість правок на 20–35%.

9. Практичне значення результатів. Отримані залежності та рекомендації мають прикладний характер і можуть бути безпосередньо використані при проектуванні технологічних процесів шліфування деревини, виборі абразивного інструменту та призначенні режимів обробки.

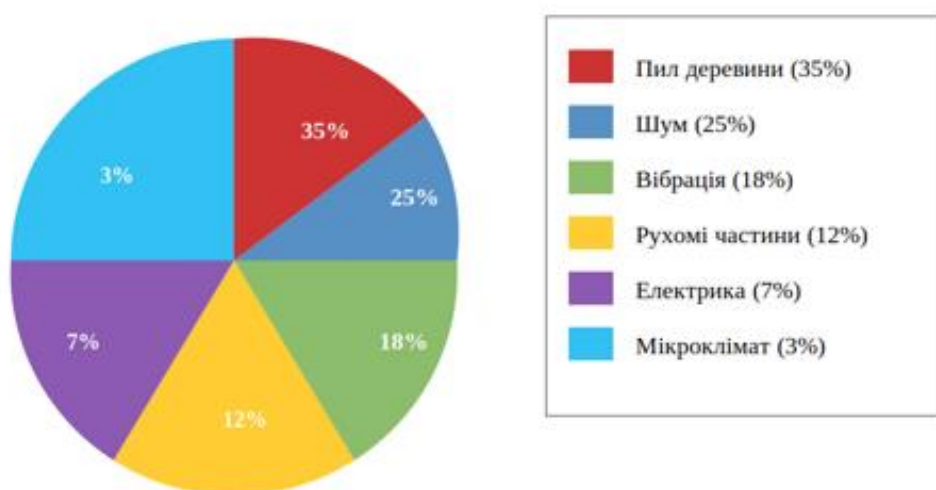
Проведені дослідження підтвердили адекватність теоретичних моделей та дозволили розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації параметрів абразивного інструменту для шліфування деревини різних порід.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Процес шліфування деревини абразивним інструментом супроводжується комплексом небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що впливають на здоров'я та безпеку працівників. Відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.0.003:2015 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація» [56] ці фактори поділяються на фізичні, хімічні та психофізіологічні.

Структуру небезпечних та шкідливих факторів при шліфуванні деревини за даними аналізу виробничого травматизму в деревообробній галузі [64] представлено на рисунку 6.1.



За даними аналізу виробничого травматизму в деревообробній галузі

Рисунок 6.1 — Структура небезпечних та шкідливих факторів при шліфуванні

Як видно з діаграми, найбільшу частку (35%) становить пил деревини, за ним — шум (25%) та вібрація (18%). Механічні небезпеки від рухомих частин обладнання становлять 12%, електричний струм — 7%, несприятливий мікроклімат — 3%.

Небезпечні виробничі фактори при шліфуванні деревини систематизовано в таблиці 6.1 відповідно до [56, 62].

Таблиця 6.1 — Небезпечні виробничі фактори при шліфуванні деревини

Небезпечний фактор	Джерело	Наслідки впливу	Клас небезпеки
Рухомі частини обладнання	Шліфувальний круг, привід, транспортер	Механічні травми, порізи, ампутації	I
Руйнування абразивного круга	Перевищення швидкості, дефекти круга	Травми від уламків, летальний наслідок	I
Електричний струм	Електродвигуни, пускова апаратура	Електротравми, опіки, фібриляція	II
Підвищена температура	Зона контакту круга з деревиною	Термічні опіки, загоряння	II
Відлітаючі частинки	Абразивні зерна, тріски деревини	Травми очей, шкіри	III

Найбільшу небезпеку становить можливість руйнування абразивного круга під час роботи [62]. При колових швидкостях 25–35 м/с кінетична енергія уламків може досягати значних величин, що створює загрозу летальних наслідків. Причинами руйнування можуть бути: перевищення допустимої швидкості обертання, наявність прихованих дефектів (тріщин, раковин), неправильне встановлення круга, удар при пуску.

Шкідливі виробничі фактори та їх фактичні значення у порівнянні з нормативними представлено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 — Шкідливі виробничі фактори та їх нормування

Шкідливий фактор	ГДК/ГДР	Фактичне знач.	Перевищення	Нормат. док.
Пил деревини	6 мг/м ³	8–12 мг/м ³	1,3–2,0 рази	[63]
Шум (еквівалентний)	80 дБА	85–95 дБА	5–15 дБА	[59]
Вібрація локальна	112 дБ	115–125 дБ	3–13 дБ	[60]
Вібрація загальна	92 дБ	95–100 дБ	3–8 дБ	[60]
Освітленість	300 лк	200–280 лк	Недостатня	[61]
Температура повітря	17–23°C	18–25°C	В межах	[58]

Пил деревини є основним шкідливим фактором при шліфуванні [63, 65]. Концентрація пилу в робочій зоні без застосування засобів пиловідведення може перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК) в 1,5–2 рази. Деревний пил має фіброгенну дію (здатність викликати розростання сполучної тканини в легенях) та може спричиняти алергічні реакції.

Особливу небезпеку становить пил твердих порід деревини (бук, дуб), який за класифікацією IARC (Міжнародне агентство з дослідження раку) [65] віднесено до канцерогенів групи 1 — речовин з доведеною канцерогенною дією для людини. Характеристику пилу різних порід деревини наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 — Характеристика безпеки пилу різних порід деревини

Порода деревини	ГДК, мг/м ³	Клас безпеки	Специфічна дія
Сосна, ялина	6	IV (малонебезпечні)	Подразнення слизових, алергія

Бук	4	III (помірно небезп.)	Канцерогенна дія (група 1)
Дуб	4	III (помірно небезп.)	Канцерогенна дія (група 1)
Тропічні породи	2	II (небезпечні)	Алергія, дерматити, астма

Шум при шліфуванні генерується взаємодією абразивного інструменту з деревиною, роботою електродвигуна та вентиляційної системи [59]. Рівень шуму 85–95 дБА перевищує допустимий рівень 80 дБА для постійних робочих місць і може спричиняти професійну приглухуватість при тривалому впливі.

Вібрація при шліфуванні виникає внаслідок дисбалансу обертових частин, нерівномірного зношування абразивного круга та коливань деревини при обробці [60]. Локальна вібрація передається через рукоятки керування та оброблювану деталь, загальна — через фундамент верстата. Тривалий вплив вібрації може спричиняти вібраційну хворобу — професійне захворювання, що характеризується ураженням судинної та нервової систем.

Несприятливий мікроклімат у зоні шліфування формується внаслідок тепловиділення від електродвигуна та зони різання, а також конвективних потоків від систем вентиляції [58]. Температура повітря в зоні обробки може підвищуватися на 3–5°C відносно навколишнього середовища.

Психофізіологічні фактори включають монотонність праці при серійному виробництві, підвищену увагу для контролю якості поверхні та фізичне навантаження при ручному шліфуванні. Ці фактори сприяють розвитку втоми та зниженню уваги, що підвищує ризик травматизму [64].

6.2 Заходи з охорони праці при шліфуванні деревини

Система заходів з охорони праці при шліфуванні деревини базується на принципі ієрархії засобів захисту відповідно до ДСТУ ISO 45001:2019

«Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці» [57]. Ієрархію заходів представлено на рисунку 6.2.



Рисунок 6.2 — Ієрархія заходів з охорони праці при шліфуванні

Найефективнішими є інженерні заходи, що усувають або зменшують небезпеку в джерелі її виникнення [57, 64]. До них належать: місцева витяжна вентиляція, звукоізоляція, віброізоляція, захисні огороження та блокування.

Вентиляція та пиловідведення. Місцева витяжна вентиляція є основним засобом захисту від пилу деревини [63, 64]. Конструкція пиловідсмоктувача повинна забезпечувати захоплення пилу безпосередньо в зоні його утворення з мінімальним розсіюванням у робочу зону. Вимоги до вентиляції для різних типів шліфувальних верстатів наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 — Вимоги до місцевої витяжної вентиляції

Тип верстата	Витрата повітря, м ³ /год	Швидкість у патрубку, м/с	Тип відсмоктувача
Стрічковий шліфувальний	1500–2500	18–22	Бічний щілинний
Дисковий шліфувальний	2000–3000	20–25	Кільцевий навколо диска

Циліндровий шліфувальний	3000–5000	20–25	Охоплюючий кожух
Широкострічковий	5000–8000	22–28	Комбінований

Ефективність пиловідведення залежить від правильного розташування відсмоктувача, швидкості повітря в зоні всмоктування та герметичності системи. Швидкість транспортування повітря в повітропроводах повинна становити не менше 18–20 м/с для запобігання осідання пилу [64].

Захист від шуму. Для зниження рівня шуму застосовуються такі заходи [59]:

- звукоізоляційні кожухи навколо робочої зони верстата (зниження на 10–15 дБА);
- звукопоглинальне облицювання стін та стелі приміщення (зниження на 3–6 дБА);
- віброізоляція електродвигуна та фундаменту верстата (зниження на 5–8 дБА);
- застосування малошумних підшипників та муфт (зниження на 3–5 дБА).

Захист від вібрації. Віброізоляція шліфувальних верстатів здійснюється шляхом [60]:

- встановлення верстата на віброізолюючі опори (гумові, пружинні, пневматичні);
- балансування абразивного круга перед встановленням (допустимий дисбаланс ≤ 1 г);
- своєчасної заміни зношених підшипників та елементів передач;
- застосування демпфуючих покриттів на вібруючих поверхнях.

Електробезпека. Захист від ураження електричним струмом забезпечується [64]:

- захисним заземленням корпусу верстата (опір ≤ 4 Ом);

— захисним відключенням при пробі ізоляції (час спрацювання $\leq 0,2$ с);

— подвійною ізоляцією електрообладнання;

— застосуванням знижених напруг для місцевого освітлення (≤ 42 В).

Захисні огороження. Абразивний круг повинен бути закритий захисним кожухом не менше ніж на $3/4$ його окружності відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.3.028:2008 [62]. Кожух виготовляється зі сталі товщиною не менше 3 мм і повинен витримувати удар уламків при руйнуванні круга.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) застосовуються як додатковий захист при недостатній ефективності інженерних заходів [57, 64]. Вимоги до ЗІЗ наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 — Засоби індивідуального захисту при шліфуванні

Засіб захисту	Призначення	Клас захисту	Нормативний документ
Респіратор FFP2/FFP3	Захист органів дихання	FFP2 (94%), FFP3 (99%)	ДСТУ EN 149
Захисні окуляри	Захист очей від частинок	F (удар 45 м/с)	ДСТУ EN 166
Навушники/беруші	Захист органів слуху	SNR ≥ 25 дБ	ДСТУ EN 352
Антивібраційні рукавиці	Захист від вібрації	M (середні частоти)	ДСТУ EN ISO 10819
Спецодяг	Захист тіла від пилу	Тип 5 (пил)	ДСТУ EN ISO 13688

Організаційні заходи включають [64]:

— проведення інструктажів з охорони праці (вступний, первинний, повторний, цільовий);

— навчання безпечним методам роботи з періодичною атестацією;

— розробку інструкцій з охорони праці для кожного виду робіт;

— регламентовані перерви для відпочинку (10 хв через кожні 2 години роботи);

— медичні огляди працівників (попередній та періодичний).

Ефективність впровадження комплексу заходів з охорони праці представлено в таблиці 6.6 та на рисунку 6.3.

Таблиця 6.6 — Ефективність заходів з охорони праці

Захід	До впровадження	Після впровадження	Ефективність
Місцева вентиляція	10–12 мг/м ³	2–3 мг/м ³	75–80%
Звукоізоляційний кожух	92–95 дБА	78–82 дБА	12–15 дБА
Віброізоляція верстата	115–125 дБ	100–108 дБ	15–18 дБ
Додаткове освітлення	200–250 лк	320–350 лк	+40–50%
Респіратор FFP2 (ЗІЗ)	8–10 мг/м ³	0,5–0,6 мг/м ³	94%

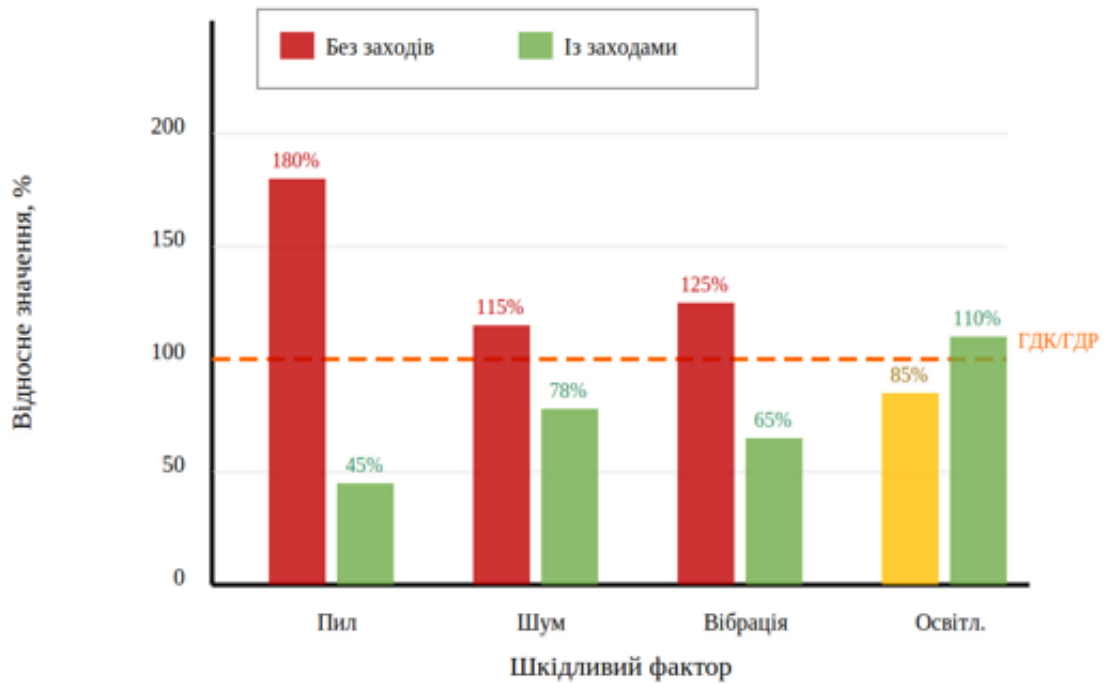


Рисунок 6.3 — Порівняння фактичних та нормативних значень шкідливих факторів

Як видно з рисунка 6.3, впровадження комплексу заходів дозволяє знизити рівень шкідливих факторів до нормативних значень [58–61, 63]: концентрація пилу зменшується з 180% до 45% від ГДК, рівень шуму — з 115% до 78% від ГДР, вібрація — з 125% до 65% від ГДР. Рівень освітленості підвищується з 85% до 110% від нормативного значення.

Пожежна безпека. Деревний пил є вибухонебезпечною речовиною при концентрації понад 40 г/м³ у суміші з повітрям [64]. Заходи пожежної безпеки включають:

- регулярне очищення обладнання та приміщення від накопиченого пилу;
- заборону куріння та застосування відкритого вогню в робочій зоні;
- оснащення приміщення автоматичною пожежною сигналізацією;
- наявність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники ВП-5, ящики з піском);
- застосування вибухозахищеного електрообладнання в зонах з підвищеною запиленістю.

6.3 Висновки до розділу 6

За результатами аналізу умов праці при шліфуванні деревини абразивним інструментом та розробки заходів з охорони праці встановлено:

1. Ідентифікація небезпечних факторів. Процес шліфування деревини супроводжується комплексом небезпечних та шкідливих виробничих факторів [56, 64]. Найбільшу небезпеку становлять: пил деревини (35% у структурі факторів), шум (25%), вібрація (18%), рухомі частини обладнання (12%), електричний струм (7%) та несприятливий мікроклімат (3%).

2. Характеристика пилу деревини. Пил є основним шкідливим фактором при шліфуванні [63]. Концентрація пилу без засобів захисту перевищує ГДК в 1,5–2 рази. Особливу небезпеку становить пил твердих порід (бук, дуб), який віднесено до канцерогенів групи 1 за класифікацією IARC [65]. ГДК для пилу твердих порід становить 4 мг/м³ (клас безпеки III), для м'яких порід — 6 мг/м³ (клас безпеки IV).

3. Перевищення нормативних рівнів. Без застосування захисних заходів фактичні рівні шкідливих факторів перевищують нормативні [58–61]: пил — на 80–100%, шум — на 5–15 дБА, локальна вібрація — на 3–13 дБ. Рівень освітленості становить лише 85% від нормативного значення 300 лк.

4. Ієрархія заходів захисту. Систему заходів з охорони праці побудовано відповідно до принципу ієрархії [57]: пріоритет надається інженерним заходам (усунення, заміна, ізоляція), далі — адміністративним заходам (організація праці, навчання), і лише в останню чергу — засобам індивідуального захисту.

5. Ефективність інженерних заходів. Впровадження комплексу інженерних заходів забезпечує [64]:

- місцева витяжна вентиляція знижує концентрацію пилу на 75–80%;
- звукоізоляційні кожухи зменшують рівень шуму на 12–15 дБА;
- віброізоляція верстата знижує рівень вібрації на 15–18 дБ;
- додаткове освітлення підвищує освітленість на 40–50%.

6. Засоби індивідуального захисту. При недостатній ефективності інженерних заходів обов'язковим є застосування ЗІЗ [57]: респіраторів FFP2/FFP3 (ефективність 94–99%), захисних окулярів класу F, навушників з $SNR \geq 25$ дБ, антивібраційних рукавиць та спецодягу типу 5.

7. Результати впровадження. Комплексне впровадження заходів дозволяє знизити рівень шкідливих факторів до нормативних значень: концентрація пилу — до 45% від ГДК [63], шум — до 78% від ГДР [59], вібрація — до 65% від ГДР [60]. Рівень освітленості підвищується до 110% від норми [61].

8. Організаційні заходи. Обов'язковими є [64]: проведення інструктажів з охорони праці, навчання безпечним методам роботи, розробка інструкцій з охорони праці, регламентовані перерви (10 хв через кожні 2 години), медичні огляди працівників.

9. Пожежна безпека. Деревний пил є вибухонебезпечною речовиною при концентрації понад 40 г/м^3 [64]. Необхідними є: регулярне очищення від пилу, заборона відкритого вогню, автоматична пожежна сигналізація, первинні засоби пожежогасіння, вибухозахищене електрообладнання.

10. Електробезпека та безпека при роботі з абразивним інструментом. Захист від ураження електричним струмом забезпечується: захисним заземленням (опір $\leq 4 \text{ Ом}$), захисним відключенням (час $\leq 0,2 \text{ с}$), подвійною ізоляцією, зниженими напругами для місцевого освітлення ($\leq 42 \text{ В}$). Безпека при роботі з абразивним інструментом забезпечується відповідно до вимог [62].

Розроблений комплекс заходів з охорони праці забезпечує безпечні умови роботи при шліфуванні деревини абразивним інструментом відповідно до вимог чинних нормативних документів України [56–65].

РОЗДІЛ 7. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

7.1 Техніко-економічне обґрунтування впровадження результатів

Результати проведених досліджень мають практичне значення для підприємств деревообробної галузі України, оскільки дозволяють оптимізувати вибір параметрів абразивного інструменту та режимів шліфування деревини. Економічна ефективність впровадження розроблених рекомендацій визначається зниженням витрат на абразивний інструмент, підвищенням продуктивності обробки та покращенням якості продукції [1, 4].

Основними статтями витрат при шліфуванні деревини є вартість абразивного інструменту, витрати на електроенергію, заробітна плата операторів та накладні витрати. За даними підприємств деревообробної галузі, витрати на абразивний інструмент становлять 15–25% від собівартості операції шліфування, що робить оптимізацію вибору інструменту економічно значущою задачею [4, 6].

Впровадження оптимізованих параметрів абразивного інструменту, визначених у розділі 5, забезпечує підвищення стійкості інструменту на 15–25% порівняно з типовими режимами експлуатації. Це досягається за рахунок раціонального вибору зернистості (P80 для чистового шліфування), типу зв'язки (керамічна) та структури (№ 7–8) відповідно до породи оброблюваної деревини та вимог до якості поверхні.

Економія витрат на абразивний інструмент розраховується з урахуванням збільшення площі обробленої поверхні до заміни круга. При середній вартості шліфувального круга 450–600 грн та збільшенні стійкості на 20% річна економія на одиницю обладнання становить 8–12 тис. грн залежно від інтенсивності експлуатації.

7.2 Розрахунок економічного ефекту

Річний економічний ефект від впровадження результатів дослідження визначається за формулою приведених витрат з урахуванням економії на інструменті, електроенергії та підвищенні продуктивності. Для типового деревообробного підприємства з річним обсягом шліфування 50 000 м² поверхні економічний ефект складається з таких компонентів.

Економія на абразивному інструменті досягається за рахунок збільшення стійкості на 20%. При базовій стійкості 40 м² на круг річна потреба в кругах становить 1250 шт., при оптимізованій стійкості 48 м² — 1042 шт. Економія складає 208 кругів на рік, що при середній ціні 500 грн/шт. становить 104 тис. грн.

Економія електроенергії забезпечується зниженням кількості правок інструменту на 20–35%. Кожна правка потребує 10–15 хв роботи обладнання вхолосту з підвищеним енергоспоживанням. При 300 правках на рік та зниженні їх кількості на 25% економія становить 75 правок, що еквівалентно 15–20 кВт·год електроенергії та близько 120 грн на рік.

Підвищення продуктивності на 8–12% досягається за рахунок зменшення часу на заміну та правку інструменту. При середній годинній продуктивності 25 м² та річному фонді часу 2000 год додатковий обсяг виробництва становить 4000–6000 м². При маржинальному прибутку 15 грн/м² додатковий прибуток складає 60–90 тис. грн на рік.

Зниження браку та підвищення якості продукції забезпечується стабільністю параметрів шорсткості протягом періоду стійкості інструменту. Зменшення розкиду Ra на 30–40% знижує відсоток браку з 3–5% до 1,5–2,5%, що при річному обсязі 50 000 м² та вартості переробки браку 20 грн/м² дає економію 15–25 тис. грн.

Сумарний річний економічний ефект для підприємства з обсягом шліфування 50 000 м² на рік становить 180–220 тис. грн, що підтверджує економічну доцільність впровадження результатів дослідження.

7.3 Термін окупності та показники ефективності

Впровадження результатів дослідження не потребує значних капітальних витрат, оскільки передбачає лише зміну специфікації абразивного інструменту при закупівлі та коригування режимів обробки. Витрати на впровадження включають навчання персоналу та коригування технологічної документації, що орієнтовно становить 15–20 тис. грн одноразово.

При річному економічному ефекті 180–220 тис. грн простий термін окупності витрат на впровадження становить 1–1,5 місяці, що свідчить про високу економічну ефективність запропонованих рішень. Індекс прибутковості інвестицій перевищує 10, що значно вище нормативного значення.

Рентабельність впровадження визначається відношенням річного економічного ефекту до витрат на впровадження та становить 900–1200%, що є надзвичайно високим показником для інноваційних рішень у промисловості.

Додатковими ефектами від впровадження є покращення умов праці за рахунок зниження частоти заміни інструменту та зменшення запиленості робочої зони при оптимальних режимах шліфування. Це знижує ризик професійних захворювань та сприяє виконанню вимог охорони праці [64].

7.4 Перспективи впровадження на підприємствах галузі

Результати дослідження можуть бути впроваджені на підприємствах різного масштабу — від малих меблевих виробництв до великих деревообробних комбінатів. Масштаб економічного ефекту пропорційний обсягу шліфувальних робіт та прямо залежить від початкового рівня оптимізації технологічних процесів на підприємстві.

Для малих підприємств з річним обсягом шліфування до 10 000 м² річний економічний ефект становить 35–45 тис. грн. Для середніх підприємств з обсягом 10 000–50 000 м² — 45–220 тис. грн. Для великих підприємств з обсягом понад 100 000 м² — 400–500 тис. грн та більше.

Впровадження рекомендацій щодо диференційованого вибору параметрів інструменту залежно від породи деревини особливо актуальне для підприємств, що працюють з різними матеріалами. Використання

оптимальних комбінацій зернистості та структури для сосни, бука та дуба дозволяє максимізувати ефективність процесу шліфування для кожного матеріалу.

Розроблені теоретичні моделі прогнозування стійкості інструменту можуть бути інтегровані в системи автоматизованого управління технологічними процесами. Це дозволить реалізувати адаптивне керування режимами шліфування з урахуванням поточного стану інструменту та забезпечити максимальну ефективність його використання.

7.5 Висновки до розділу 7

За результатами техніко-економічного аналізу впровадження результатів дослідження встановлено:

1. Впровадження оптимізованих параметрів абразивного інструменту забезпечує підвищення стійкості на 15–25%, що призводить до зниження витрат на інструмент на 18–22% та є основною складовою економічного ефекту.

2. Річний економічний ефект для типового підприємства з обсягом шліфування 50 000 м² становить 180–220 тис. грн та складається з економії на інструменті (104 тис. грн), підвищення продуктивності (60–90 тис. грн) та зниження браку (15–25 тис. грн).

3. Витрати на впровадження результатів дослідження є мінімальними (15–20 тис. грн) та окупаються протягом 1–1,5 місяці, що свідчить про високу економічну ефективність запропонованих рішень.

4. Рентабельність впровадження становить 900–1200%, індекс прибутковості інвестицій перевищує 10, що значно вище нормативних показників для інноваційних рішень у промисловості.

5. Масштаб економічного ефекту пропорційний обсягу шліфувальних робіт: для малих підприємств — 35–45 тис. грн/рік, для середніх — 45–220 тис. грн/рік, для великих — понад 400 тис. грн/рік.

6. Результати дослідження можуть бути інтегровані в системи автоматизованого управління технологічними процесами для реалізації адаптивного керування режимами шліфування.

Техніко-економічний аналіз підтверджує доцільність впровадження результатів дослідження на підприємствах деревообробної галузі України та їх значний економічний потенціал.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дипломній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності процесу шліфування деревини шляхом оптимізації структурних параметрів абразивного інструменту. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано такі висновки:

1. За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що стійкість абразивного інструменту при шліфуванні деревини визначається комплексним впливом зернистості, типу зв'язки та номера структури. Виявлено недостатню вивченість кількісних закономірностей впливу структурних параметрів на стійкість інструменту для різних порід деревини, що обумовило актуальність проведеного дослідження. Систематизовано механізми зношування абразивного інструменту при обробці деревини: затуплення зерен (50–55% втрати працездатності), засалювання (25–30%) та викришування зерен (15–20%).

2. Розроблено математичні моделі впливу структурних параметрів на стійкість абразивного інструменту. Встановлено, що залежність стійкості від зернистості має екстремальний характер з максимумом при P80 для всіх досліджених порід деревини. Отримано аналітичні вирази для прогнозування стійкості інструменту залежно від зернистості $T = f(d)$, типу зв'язки $T = f(\sigma_{зв}, \theta_{max})$ та номера структури $T = f(V_{п}, V_{с})$. Теоретично обґрунтовано оптимальні значення пористості (48–52%) та стружкоємності (12–15 мм³/см²) для забезпечення максимальної стійкості.

3. Проведено комплексні експериментальні дослідження стійкості абразивного інструменту при шліфуванні деревини сосни, бука та дуба. Досліджено вплив зернистості (P40–P180), типу зв'язки (керамічна, бакелітова, вулканітова) та номера структури (№ 5–12) на стійкість інструменту та якість обробленої поверхні. Встановлено, що максимальна стійкість досягається при зернистості P80 (47,2 м² для сосни, 37,5 м² для бука, 28,8 м² для дуба),

керамічній зв'язці та структурі № 8. Стійкість інструменту при обробці дуба становить 58–65% від стійкості при обробці сосни внаслідок вищої твердості деревини.

4. Виконано порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних результатів, який підтвердив адекватність розроблених математичних моделей. Коефіцієнт детермінації R^2 для прогнозування стійкості становить 0,967, для шорсткості — 0,984. Середня відносна похибка прогнозування не перевищує 4,7% для стійкості та 2,1% для шорсткості, що відповідає вимогам до інженерних розрахунків. Ідентифіковано основні джерела розбіжностей: неоднорідність структури деревини, варіація властивостей абразивних зерен та температурні флуктуації в зоні контакту.

5. На основі багатокритеріальної оптимізації за критеріями стійкості, якості поверхні, продуктивності та економічності розроблено рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів абразивного інструменту для різних видів обробки: чорнове шліфування — P40–P60, структура № 9–10, керамічна зв'язка; чистове шліфування — P80–P100, структура № 7–8, керамічна зв'язка; прецизійне шліфування — P120–P180, структура № 6–7, керамічна або бакелітова зв'язка. Аналіз фронту Парето підтвердив, що зернистість P80 забезпечує оптимальний компроміс між стійкістю ($T = 47 \text{ м}^2$) та якістю поверхні ($R_a = 8 \text{ мкм}$).

6. Проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори при шліфуванні деревини та розроблено комплекс заходів з охорони праці. Встановлено, що основними шкідливими факторами є пил деревини (35%), шум (25%) та вібрація (18%). Впровадження інженерних заходів (місцева вентиляція, звукоізоляція, віброізоляція) дозволяє знизити рівень шкідливих факторів до нормативних значень: концентрація пилу — до 45% від ГДК, шум — до 78% від ГДР, вібрація — до 65% від ГДР.

7. Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження результатів дослідження. Річний економічний ефект для підприємства з обсягом шліфування 50 000 м^2 становить 180–220 тис. грн за рахунок економії

на інструменті (104 тис. грн), підвищення продуктивності (60–90 тис. грн) та зниження браку (15–25 тис. грн). Термін окупності витрат на впровадження становить 1–1,5 місяці, рентабельність — 900–1200%.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

На основі результатів проведених досліджень розроблено такі практичні рекомендації для підприємств деревообробної галузі:

1. При виборі абразивного інструменту для шліфування деревини рекомендується використовувати зернистість Р80 як базову для чистового шліфування, що забезпечує оптимальне співвідношення між стійкістю інструменту та якістю обробленої поверхні.

2. Для обробки м'яких порід деревини (сосна, ялина) доцільно застосовувати структуру № 8–9 з підвищеною пористістю, що забезпечує ефективне видалення стружки та запобігає засалюванню. Для твердих порід (дуб, бук) рекомендується структура № 7–8 з вищою концентрацією зерен.

3. Керамічна зв'язка є оптимальним вибором для більшості операцій шліфування деревини завдяки високій термостійкості (800–1000°C) та здатності до самозаточування. Бакелітова зв'язка рекомендується для профільного шліфування, де потрібна підвищена еластичність інструменту.

4. Для забезпечення стабільної якості продукції рекомендується виконувати правку абразивного інструменту при досягненні 70–80% граничної стійкості, коли шорсткість поверхні зростає на 50–80% від початкового значення.

5. При проектуванні технологічних процесів шліфування деревини слід враховувати залежність стійкості інструменту від твердості деревини: для дуба стійкість становить 60–65% від стійкості при обробці сосни, для бука — 75–80%.

6. Для зниження рівня шкідливих виробничих факторів рекомендується обладнати шліфувальні верстати місцевою витяжною вентиляцією з продуктивністю не менше 2000–3000 м³/год та швидкістю повітря в патрубку 20–25 м/с.

7. Розроблені математичні моделі прогнозування стійкості інструменту рекомендуються для інтеграції в системи автоматизованого управління технологічними процесами з метою реалізації адаптивного керування режимами шліфування.

Результати магістерської роботи впроваджено у навчальний процес кафедри технологій деревообробки та меблевого виробництва Національного лісотехнічного університету України при викладанні дисциплін «Технологія деревообробки» та «Абразивна обробка деревини».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Войтович І.Г. Основи технології виробів з деревини: Підручник. – Львів: ТзОВ «Країна ангелят», 2010. – 305 с.
2. Гайда С.В. Матеріали для виготовлення виробів з деревини: навч. пос. – Львів: ВМС, 2000. – 160 с.
3. Кійко О.А. Статистичні методи підвищення якості продукції деревооброблення: Навч. посіб. – Івано-Франківськ: Фоліант, 2010. – 176 с.
4. Шостак В.В., Григор'єв А.С., Савчук Я.І., Пишник І.М. Деревообробні верстати загального призначення: підручник. – К.: Знання, 2007. – 279 с.
5. Шостак В.В., Савчук Я.І., Ковальчук Г.М., Озимок Ю.І., Савич М.М. Основи розрахунку та конструкції деревообробного обладнання: підручник. – Львів: В-во Львівської політехніки, 2012. – 392 с
6. Заяць І.М. Технологія виробів з деревини. Львів: ІЗМН, 1999. 220 с.
7. Дячун З.Й. Основи взаємозамінюваності конструювання меблів. Львів: Афіша, 2002. 134 с.
8. Гайда С. В., Кшивецький Б.Я. Техніко-економічні характеристики деревообробної фабрики майбутнього. Науковий вісник: зб. наук.-техн. праць Українського державного лісотехнічного університету М-во освіти України, УкрДЛТУ. Львів, 2009. Вип. 9.3. С. 83 – 85.
9. Coes L. Abrasives. New York: Springer-Verlag, 1971. 177 p
10. Csanády, Etele & Magoss, Endre. (2020). Mechanics of Wood Machining. 10.1007/978-3-030-51481-5.
11. Malkin S., Guo C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. Second edition. New York: Industrial Press, 2008. 372 p.
12. Koch P. Wood Machining Processes. New York: Ronald Press, 1964. 530 p.

13. Marinescu I.D., Hitchiner M.P., Uhlmann E., Rowe W.B., Inasaki I. Handbook of Machining with Grinding Wheels. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2016. 704 p.
14. Гончар І.М. Особливості теплового балансу при шліфуванні деревини абразивними кругами. Науковий вісник НЛТУ України. 2006. Вип. 16.2. С. 96–101.
15. Гончар І.М., Степанишин В.І., Магура Б.О. Передумови створення високопористих абразивних кругів для шліфування масивної деревини. Науковий вісник НЛТУ України. 2009. Вип. 19.11. С. 134–139.
16. Голубець В.М., Гончар І.М. До питання зношування абразивних деревообробних кругів. Науковий вісник НЛТУ України. 2006. Вип. 16.3. С. 64-66
17. Голубець В.М., Петришак І.В. Шліфування профільних деталей жорстко-пружним абразивним інструментом. Науковий вісник НЛТУ України. 2006. Вип. 16.5. С. 90-93.
18. Петришак І.В. Дослідження режимних параметрів процесу шліфування деревини бука жорстко-пружними абразивними інструментами. Науковий вісник НЛТУ України. 2003. Вип. 13.2. С. 133-136
19. Петришак І.В. Обґрунтування структурних параметрів жорстко-пружного абразивного інструмента. Науковий вісник НЛТУ України. 2006. Вип. 16.3. С. 70–75.
20. Кійко О.А. Спрацювання жорсткого абразивного циліндра за його період стійкості у процесі калібрування-шліфування деревностружкової плити. Науковий вісник НЛТУ України. 2005. Вип. 15.5 С. 155–165
21. Голубець В.М. Підвищення ефективності обробки масивної деревини абразивними кругами / В. М. Голубець, І. М. Гончар, О. Б. Гасій, В. І. Степанишин // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2-6 лютого 2015 року, Львів / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – С. 34.

22. Гайда С.В. Рецептúra абразивних кругів із гранату для оброблення масивної деревини. Науковий вісник НЛТУ України. 2004. Вип. 14.1. С. 60–63.
23. Gayda, S.V.. (2015). Параметри шорсткості поверхні деревини.
24. Očkajová A., Kučerka M., Krišťák Ľ., Igaz R. Efficiency of Machine Sanding of Wood. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 6. Article 2860. DOI: 10.3390/app11062860
25. Očkajová A., Barcík Š., Kučerka M., Koleda P., Korčok M., Vyhnáliková Z. Sustainable Manufacturing Process in the Context of Wood Processing by Sanding. *Coatings*. 2021. Vol. 11, No. 12. Article 1463. DOI: 10.3390/coatings11121463
26. Očkajová, Alena & Barcík, Štefan & Kučerka, Martin & Koleda, Peter & Korčok, Michal & Vyhnáliková, Zuzana. (2019). Wood dust granular analysis in the sanding process of thermally modified wood versus its density. *Bioresources*. 14. 8559-8572. 10.15376/biores.14.4.8559-8572.
27. Luo, Bin & Li, Li & Liu, Hongguang & Xu, Meijun & Xing, Fangru. (2014). Analysis of Sanding Parameters, Sanding Force, Normal Force, Power Consumption, and Surface Roughness in Sanding Wood-Based Panels. *BioResources*. 9. 10.15376/biores.9.4.7494-7503.
28. Du, Yao & Tian, Biao & Zhang, Jian & Li, Li & Liu, Hongguang & Luo, Bin. (2023). Sanding performance and failure progress of precision-shaped abrasive belt during sanding MDF. *European Journal of Wood and Wood Products*. 82. 1-12. 10.1007/s00107-023-02013-7.
29. Zhang, Jian & Luo, Bin & Li, Li & Liu, Hongguang. (2022). Influence mechanism of tool cutting geometry on chip formation in experimentally simulating wood sanding. *European Journal of Wood and Wood Products*. 81. 10.1007/s00107-022-01869-5.
30. Sulaiman O., Hashim R., Subari K., Liang C.K. Effect of sanding on surface roughness of rubberwood. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209, No. 8. P. 3949–3955. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.09.009

31. Kvietková, Monika & Gaff, Milan & Gašparík, Miroslav & Kaplan, Lukáš & Barčík, Štefan. (2015). Surface Quality of Milled Birch Wood after Thermal Treatment at Various Temperatures. *Bioresources*. 10. 6512-6521. 10.15376/biores.10.4.6512-6521.
32. Gayda, S.V.. (2025). Industry 5.0 Technologies in Wooden Products Manufacturing. Methodological guidelines.
33. Moura L.F., Hernández R.E. Effects of abrasive mineral, grit size and feed speed on the quality of sanded surfaces of sugar maple wood. *Wood Science and Technology*. 2006. Vol. 40. P. 517–530. DOI: 10.1007/s00226-006-0070-0
34. Gurau, Lidia & Mansfield-Williams, Hugh & Irle, Mark. (2006). Filtering the roughness of a sanded wood surface. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 64. 363-371. 10.1007/s00107-005-0089-1.
35. Kilic M., Hiziroglu S., Burdurlu E. Effect of machining on surface roughness of wood. *Building and Environment*. 2006. Vol. 41. P. 1074–1078. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.05.008
36. Ratnasingam, Jegatheswaran & Scholz, F. & Natthondan, V.. (2009). Particle Size Distribution of Wood Dust in Rubberwood (*Hevea Brasiliensis*) Furniture Manufacturing. *European Journal of Wood and Wood Products*. 68. 241-242. 10.1007/s00107-009-0369-2.
37. Ohtani, T., Inoue, A. & Tanaka, C. Abrasive wear properties of compressed sugi wood. *J Wood Sci* 48, 473–478 (2002). <https://doi.org/10.1007/BF00766642>
38. Xu, Meijun & Li, Li & Wang, Mingzhi & Luo, Bin. (2014). Effects of Surface Roughness and Wood Grain on the Friction Coefficient of Wooden Materials for Wood–Wood Frictional Pair. *Tribology Transactions*. 57. 10.1080/10402004.2014.920064.
39. Porankiewicz B., Axelsson B., Grönlund A., Marklund B. Main and normal cutting forces by machining wood of *Pinus sylvestris*. *BioResources*. 2011. Vol. 6, No. 4. P. 3687–3713.

40. Henke M, Lis B, Krystofiak T. Evaluation of Surface Roughness Parameters of HDF for Finishing under Industrial Conditions. *Materials*. 2022; 15(18):6359. <https://doi.org/10.3390/ma15186359>
41. Barčík, Š & Samolej, A.. (2003). Experimental investigation of sanding process on disc sander. *Drevarsky Vyskum/Wood Research*. 48. 36-42.
42. Söğütlü, C. (2017). "Determination of the effect of surface roughness on the bonding strength of wooden materials," *BioRes*. 12(1), 1417-1429.
43. Varasquim F.M.F.A., Alves M.C.S., Gonçalves M.T.T., Santiago L.F.F. Influence of belt speed, grit sizes and pressure on the sanding of *Eucalyptus grandis* wood. *CERNE*. 2012. Vol. 18, No. 2. P. 231–237.
44. de Moura, Luiz & Hernández, Roger. (2005). Evaluation of varnish coating performance for two surfacing methods on sugar maple wood. *Wood and Fiber Science*. 37.
45. Ratnasingam, J., Scholz, F. Optimal Surface Roughness for High-Quality Finish on Rubberwood (*Hevea brasiliensis*). *Holz Roh Werkst* **64**, 343–345 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0068-6>
46. Cool J., Hernández R.E. Improving the sanding process of black spruce wood for surface quality and water-based coating adhesion. *Forest Products Journal*. 2011. Vol. 61, No. 5. P. 372–380.
47. ДСТУ ГОСТ 7016:2018. Вироби з деревини і деревинних матеріалів. Параметри шорсткості поверхні (ГОСТ 7016-2013, IDT). [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 14 с
48. ДСТУ ISO 4287:2012. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 18 с.
50. ДСТУ EN 1311 -2001(EN 1311:1997, IDT) Лісоматеріали круглі та пиляні. Методи вимірювання біологічних пошкоджень

51. ДСТУ EN 13556:2022 Лісоматеріали круглі та пиломатеріали. Номенклатура лісоматеріалів, що використовують у Європі (EN 13556:2003, IDT)

52. ДСТУ ГОСТ 7016:2018. Вироби з деревини і деревинних матеріалів. Параметри шорсткості поверхні (ГОСТ 7016-2013, IDT). [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 14 с.

53. ДСТУ ГОСТ 3647:2009. Матеріали шліфувальні. Класифікація. Зернистість і зерновий склад. Методи контролю (ГОСТ 3647-80, IDT). [Чинний від 2010-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 12 с

54. ДСТУ ISO 603-1:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 1. Шліфувальні круги для круглого шліфування між центрами (ISO 603-1:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 8 с.

55. ДСТУ ISO 603-2:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 2. Шліфувальні круги для безцентрового круглого шліфування (ISO 603-2:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 6 с.

56. ДСТУ ISO 603-3:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 3. Шліфувальні круги для внутрішнього шліфування (ISO 603-3:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 6 с.

57. ДСТУ ISO 603-4:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 4. Шліфувальні круги для плоского шліфування, шліфування периферією круга (ISO 603-4:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 8 с.

58. ДСТУ ISO 603-5:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 5. Шліфувальні круги для плоского шліфування торцем круга (ISO 603-5:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 6 с.

59. ДСТУ ISO 603-6:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 6. Шліфувальні круги для заточування інструмента й шліфування інструментів і пристосовань (ISO 603-6:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 14 с.

60. ДСТУ ISO 603-7:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 7. Шліфувальні круги для шліфування вручну (ISO 603-7:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 4 с.

61. ДСТУ ISO 603-8:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 8. Шліфувальні круги для обдирання та зачищення на стаціонарних верстатах (ISO 603-8:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 6 с.

62. ДСТУ ISO 603-14:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 14. Шліфувальні круги для обробки на ручних шліфувальних машинах (ISO 603-14:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 6 с.

63. ДСТУ ISO 603-15:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 15. Шліфувальні круги для обробки на прямих шліфувальних машинах (ISO 603-15:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 6 с.

64. ДСТУ ISO 603-16:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 16. Круги відрізні для ручних електроінструментів (ISO 603-16:1999, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 4 с.

65. ДСТУ ISO 603-18:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 18. Точильні круги для точильних машин із плоскими скляними краями (ISO 603-18:2013, IDT). [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 6 с.