



С. В. Гайда, Л. В. Медвідь

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ГЛИБИНИ ПОВЕРХНЕВОГО ОЧИЩЕННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ВІД РЕЖИМІВ РОБОТИ ГОЛКОФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА

Наведено результати комплексного експериментального дослідження процесу поверхневого очищення заготовок із вживаної деревини методом голкофрезерування за умов варіювання двох основних технологічних параметрів: швидкості подачі заготовки у межах 4-16 м/хв та натягу голкофрези в діапазоні 0,6-4,6 мм. На підставі експериментальних даних побудовано рівняння регресії другого степеня з натуральними змінними, яке відображає кількісний вплив зазначених параметрів на глибину очищення поверхневого шару заготовок із вживаної деревини та дає змогу визначити раціональні режими роботи голкофрезерного верстата. Встановлено, що натяг голкофрези є домінуючим фактором, який забезпечує зростання інтенсивності проникнення голок у поверхню забрудненої заготовки та ефективність видалення залишків лакофарбових покриттів і побутових забруднень, нагромаджених у процесі багаторічної експлуатації виробів із деревини. Для швидкості подачі характерний параболічний вплив: глибина поверхневого очищення заготовок збільшується до $V \approx 10$ м/хв, після чого зменшується через скорочення тривалості контакту інструмента з поверхнею деревини. Виявлений негативний коефіцієнт взаємодії факторів VS підтверджує наявність ефекту взаємного гальмування, що зумовлює формування обмеженої раціональної зони технологічних параметрів – режимів роботи голкофрезерного верстата, у межах якої забезпечується максимальна результативність очищення без надмірного пошкодження поверхневого шару деревини. На підставі аналізу експериментальних даних, графічної інтерпретації та моделі визначено раціональні параметри очищення: $V = 8-11$ м/хв та $S = 2,2-3,2$ мм. Порівняння результатів з даними інших дослідників підтвердило їх наукову достовірність та узгодженість отриманих закономірностей. Проведене дослідження має прикладне значення для удосконалення технологій перероблення вторинної деревини, підвищення якості підготовки заготовок до склеювання, а також для впровадження принципів циркулярної економіки та концепції Industry 5.0 у деревообробні виробництва. Отримані результати можна використати для вдосконалення режимів роботи голкофрезерного устаткування під час очищення поверхонь із вживаної деревини різного ступеня забруднення.

Ключові слова: столярна плита; дерев'яні заготовки; голкофрезерний інструмент; поверхневі лакофарбові забруднення; циркулярна економіка; конструкційні деревинні матеріали.

Вступ / Introduction

За сучасних умов деревообробна промисловість швидко трансформується під впливом глобальних тенденцій сталого розвитку, циркулярної економіки [8, 34] та Industry 5.0 [20]. Значна частина деревини, яка потрапляє у відходи внаслідок демонтажу будівельних конструкцій, списання тари, піддонів, меблів та інших виробів, залишається неутілізованою або переробляється на продукцію із низькою доданою вартістю (біопаливо, тріска, компост). Водночас, реальний потенціал цієї вживаної деревини [7, 18] дає змогу виготовляти повноцінні конструкційні або меблеві напівфабрикати,

якщо забезпечити розмірно-раціональне сортування [6, 29], якісне очищення поверхні від лакофарбових покриттів, забруднень, нагарів і залишків експлуатаційних матеріалів.

Проблема очищення вживаної деревини полягає в наявності стійких забруднень, таких як залишки фарби, лаку чи хімічних просочень, які можуть містити токсичні речовини, а також механічних дефектів (іржаві цвяхи, скоби) та біологічних пошкоджень (гниття, грибок, комахи). Очищення деревини ускладнюється тим, що його методи мають бути економічно вигідними, не пошкоджувати структуру деревини та бути ефективними для видалення різних типів забруднень.

Інформація про авторів:

Гайда Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор, кафедра технологій меблів і виробів з деревини.

Email: serhiy.hayda@nltu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661>

Медвідь Любомир Володимирович, аспірант, кафедри технологій меблів і виробів з деревини.

Email: lyubomyr.medvid@nltu.edu.ua; <https://orcid.org/0009-0006-6654-9348>

Цитування за ДСТУ: Гайда С. В., Медвідь Л. В. Встановлення залежності глибини поверхневого очищення заготовок із вживаної деревини від режимів роботи голкофрезерного верстата. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 6. С. 25–32.

Citation APA: Gayda, S. V., & Medvid, L. V. (2025). Establishing the dependence of the surface-cleaning depth of post-consumer wood blanks on the operating parameters of a needle-milling machine. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(6), 25–32.

<https://doi.org/10.36930/40350603>

Серед усіх технологічних операцій з відновлення деревини однією з найбільш трудомістких та критичних є її поверхнєве очищення від різних забруднень [5, 7]. Воно не тільки визначає подальшу якість і раціональність брусків до склеювання, а й безпосередньо впливає на механічну надійність готових виробів, особливо у виробництві столярних плит із вживаної деревини [12, 13, 30]. Тому вибір технології очищення вживаної деревини та оптимізація режимів її роботи є ключовими елементами ефективного використання ще якісної деревини вторинного походження.

Наразі бракує системних досліджень, які кількісно описували б взаємозв'язок технологічних параметрів роботи голкофрезерного очищення і фактичного результату – глибини очищення поверхні вживаної деревини. Тому у комплексі така проблема формує наукове завдання, без вирішення якого неможливе повноцінне впровадження вживаної деревини в цикли вторинного виробництва. Це створює також практичну прогалину та стримує широке впровадження технологій повторного використання деревини в меблевому та столярному виробництві. Адже залучення вживаної деревини до виготовлення щитових конструкційних матеріалів [10] частково вирішить проблему первинної деревини, починаючи від лісозаготівлі [11].

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що глибина поверхнєвого очищення заготовок із вживаної деревини є функцією двох основних факторів – швидкості подачі заготовки та натягу голкофрези, а вплив кожного з них є нелінійним і взаємозалежним. Тому двофакторна регресійна модель другого степеня дасть змогу адекватно описати процес і забезпечить практичні рекомендації.

Об'єкт дослідження – очищення поверхні заготовок із вживаної деревини.

Предмет дослідження – методи і засоби встановлення залежності глибини поверхнєвого очищення заготовок із вживаної деревини від режимів роботи голкофрезерного верстата, які дадуть змогу встановити собівартість виконання операції, що робить його менш привабливим порівняно з використанням нової деревини.

Мета роботи – побудувати рівняння регресії, яке опише залежність глибини поверхнєвого очищення заготовок із вживаної деревини від режимів роботи голкофрезерного верстата, що забезпечить максимальне видалення забруднень без надмірної втрати матеріалу, а також дасть змогу визначити ефективність виконання цієї операції.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- підготувати заготовки із вживаної деревини зі забрудненими поверхнями, що дасть змогу провести експериментальні спостереження щодо поверхнєвого очищення за допомогою голкофрезерного верстата;
- застосовувати метод регресійного аналізу для визначення коефіцієнтів рівняння регресії для побудови регресійної моделі другого степеня, що дасть змогу отримати кількісний опис закономірностей зміни глибини очищення h ;
- побудувати регресійну модель другого степеня, що опише залежність глибини поверхнєвого очищення заготовок із вживаної деревини від двох технологічних факторів – швидкості подачі заготовки V та натягу голкофрези S ;
- побудувати графічні залежності, які дадуть змогу комплексно оцінити вплив швидкості подачі заготовки та натягу голкофрези на глибину поверхнєвого очищення

заготовок із вживаної деревини та виявити закономірності, що визначають ефективність виконання цієї операції;

- визначити раціональний технологічний режим голкофрезерного поверхнєвого очищення для заготовок із вживаної деревини, що забезпечить максимальне видалення забруднень без надмірної втрати матеріалу.
- надати технологічні рекомендації до процесу поверхнєвого очищення заготовок із вживаної деревини, що можна використати для автоматизованого регулювання режимів роботи верстатів, інтеграції у системи цифрових двійників, роботизованих ліній та адаптивних рішень Industry 5.0.

Отже, побудова регресійної моделі другого степеня, що описує залежність глибини поверхнєвого очищення заготовок із вживаної деревини – це незначний внесок у реалізацію принципів циркулярної економіки, оскільки забезпечує можливість: продовження життєвого циклу деревини через повторне використання; зменшення обсягів деревних відходів; скорочення потреби у первинній сировині; отримання стабільних напівфабрикатів для вторинних виробів. У контексті Industry 5.0 результати дослідження створюють передумови для: впровадження адаптивних та інтелектуальних режимів роботи голкофрезерних верстатів; використання даних регресійної моделі у системах цифрового аналізу очищених заготовок; підвищення ефективності й енергозбереження технологічних процесів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У дослідженнях [7, 38, 39, 42] автори проаналізували властивості вторинної деревини та показали, що ступінь поверхнєвого забруднення й наявність старих покриттів істотно впливають на можливість її подальшого використання у щитових výroбах, зокрема столярних плит [17, 19, 24]. В іншій роботі [6] також наголошено, що належне сортування та якісне очищення поверхні є ключовим етапом перед повторним використанням вживаної деревини.

У роботах [2, 16] досліджено вплив старіння деревини та попередніх умов експлуатації на її механічні й поверхнєві характеристики, до того ж автори підкреслюють важливість повного видалення старих лакофарбових систем перед склеюванням або фрезеруванням. Згідно з їхніми висновками, недостатнє очищення призводить до зниження міцності столярних плит.

У роботі [3] проаналізовано вплив поверхневих забруднень на адгезію деревини під час склеювання. Автори продемонстрували, що навіть мінімальна наявність покриття або забруднювачів призводить до зниження адгезії на 20-60 %, що підтверджує необхідність технологій механічного очищення перед виготовленням композитів чи столярних плит.

У дослідженні [5] проаналізовано режими голкофрезерного очищення вживаної деревини. Автор визначив, що інструменти ударно-різальної дії забезпечують кращу здатність до видалення старих покриттів на неоднорідних поверхнях порівняно з абразивними та стругальними методами.

У роботі [33] автори дослідили кінематику багатоголкових ударних інструментів і показали, що поєднання подачі та глибини проникнення інструмента формує нелінійні залежності, які важко описати аналітично без застосування методів моделювання другого степеня. Це підтверджує доцільність використання моделі поверхні відгуку для опису процесу.

У праці [45] чені досліджують моделі взаємодії ударно-абразивних голок з деревиною, що дає теоретичну базу для розуміння формування глибини очищення. Додатково питання зношення інструмента та контактування голок у процесі оброблення досліджували науковці [40], а також [37], які наголошують на впливі подачі та притискного навантаження на якість поверхні.

У роботі [22] досліджено вплив параметрів фрезерування на якість поверхні деревини, причому автори продемонстрували, що швидкість подачі та геометрія інструмента мають виражену нелінійну взаємодію. Залежності, які вони отримали, аналогічні тим, що є у процесах ударно-різального очищення.

У систематичних оглядах [8, 25] проаналізовано роль повторного використання деревини у циркулярній економіці. Автори наголошують, що саме механічне очищення є найперспективнішою технологією для відновлення якості деревини після експлуатації, оскільки дає змогу зберегти її структуру без надмірного видалення матеріалу.

У працях [20, 21, 26] досліджено можливості цифровізації процесів перероблення деревини у межах концепції Industry 4.0 та Industry 5.0. Автори наголошують, що математичні моделі, побудовані на підставі експериментальних даних, є основою для впровадження адаптивних, гнучких систем керування.

У роботі [35] розглянуто підходи до розроблення цифрових двійників для виробничих процесів, зокрема для матеріалів біологічного походження. Автор послідовно доводить, що моделі другого степеня (RSM) є базовою складовою частиною цифрових платформ для вдосконалення технологічних режимів механічного оброблення, таких як швидкість подачі, глибина проникнення інструмента та інші параметри, що визначають якість і продуктивність процесів різання, фрезерування й очищення матеріалів. Використання методології поверхні відгуку для процесів фрезерування деревини розглядали у роботах [22, 23], демонструючи високу точність прогнозування параметрів оброблення.

У дослідженні [32] обґрунтовано методи побудови моделей поверхні відгуку та визначення раціональних технологічних параметрів у завданнях оброблення матеріалів. Автор демонструє, що такі моделі є найефективнішими для процесів із вираженою нелінійністю та взаємодією факторів – саме такими, як у голкофрезерному очищенні.

Згідно з численними аналізами наявних досліджень [4, 9, 15, 27, 28], вживану деревину розглядають як перспективний ресурс для виготовлення конструкційних матеріалів за умови належної підготовки поверхні та видалення старих покриттів.

Отже, проведений аналіз наукових джерел засвідчив те, що, незважаючи на значну кількість досліджень з механічного очищення та фрезерування вживаної деревини, а також сучасний інтерес до повторного використання деревини як вторинної сировини у контексті циркулярної економіки у науковій літературі фактично немає комплексних робіт, які кількісно описували б залежність глибини поверхневого очищення вживаної деревини від технологічних параметрів роботи голкофрезерного верстата. Зазначене визначає наявну наукову прогалину й обґрунтовує актуальність і необхідність проведеного саме нашого дослідження.

Матеріали та методи дослідження. Для проведення експерименту було використано заготовки із вживаної деревини, отримані шляхом розбирання віконних і дверних блоків, які втратили експлуатаційну раціональність. Заготовки вологістю 9-12 % відбирали за такими критеріями: ширина: 20, 30 та 40 мм; товщина: 24 мм; довжина: 900-1100 мм; порода: сосна; поверхневе забруднення: старі лакофарбові покриття.

Очищення проводили на лабораторному голкофрезерному верстаті, оснащеному циліндричною голкофрезою типу ГФЦ-200 діаметром 200 мм та робочою шириною 40 мм. Робоча поверхня голкофрези містила приблизно 80-90 голок на 1 см², що забезпечувало інтенсивне ударно-різальне очищення поверхні дерев'яної заготовки. Різальні елементи голкофрези було виготовлено з пружинного дроту загартованої вуглецевої сталі марки 65Г діаметром 1 мм, довжиною вильоту 30 мм, коефіцієнтом щільності дротяного ворсу 0,7 з підвищеною зносостійкістю, що дає змогу стабільно підтримувати геометрію інструмента впродовж тривалого часу експлуатації.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Методика очищення досліджуваних зразків. У межах роботи було визначено два основних змінних технологічних фактори: швидкість подачі V заготовки межах 4-16 м/хв та натяг (прижим) S голкофрези до заготовки в межах 0,6-4,6 мм. Для побудови математичної моделі застосовано двофакторне планування експерименту другого степеня (таблиця). Цей метод дає змогу визначити: лінійні ефекти факторів, взаємодію між факторами (VS), квадратичні ефекти, що відображають нелінійність процесу, побудувати поверхню відгуку.

Таблиця. Матриця В-плану для двох змінних факторів / B-design matrix for two variable factors

№ досліджу	Значення вхідних факторів у досліді				
	у натуральному позначенні			у кодованому позначенні	
		V	S	x_1	x_2
ПФП 2	1	4	0,6	-1	-1
	2	16	0,6	1	-1
	3	4	4,6	-1	1
	4	16	4,6	1	1
Зіркові точки	5	4	2,6	-1	0
	6	16	2,6	1	0
	7	10	0,6	0	-1
	8	10	4,6	0	1

Унаслідок експерименту було отримано масив результатів (40 очищень) глибини поверхневого очищення h (мм) для кожної комбінації факторів – швидкості подачі V та натягу голкофрези S .

Аналіз отриманих значень показав такі закономірності: зі збільшенням швидкості подачі V від 4 до 16 м/хв середня глибина очищення зменшувалася на 20-45 %; зі збільшенням натягу голкофрези S від 0,6 до 4,6 мм глибина очищення зростала майже лінійно у межах 30-70 %; за екстремальних комбінацій (низька швидкість + великий натяг) спостерігалася надлишкове змінання деревини та ледь помітний ризик утворення мікророзривів волокон; у центрі плану ($V \approx 10$ м/хв, $S \approx 2,6$ мм) величина очищення стабілізувалася та показала мінімальну дисперсію – найкращу повторюваність.

Отримані результати продемонстрували: фактор швидкості подачі V є статистично значущим ($p < 0,01$); фактор натягу S є високозначущим ($p < 0,001$); взаємодія факторів VS також виявилася значущою ($p < 0,05$), що підтверджує нелінійний та взаємозалежний характер процесу; квадратичні члени V^2 та S^2 істотно впливають на характер поверхні відгуку, що є підставою використовувати регресійну модель другого степеня. Коефіцієнт детермінації моделі досягнув: $R^2 = 0,93 \div 0,96$, що свідчить про високу адекватність та здатність моделі описувати реальні експериментальні дані з точністю понад 93 %.

За результатами проведених експериментів отримано рівняння регресії другого степеня (математичну модель) в нормалізованих значеннях змінних факторів:

$y = 2,2 - 0,044x_1 + 1,459x_2 - 0,405x_1^2 - 0,098x_2^2 - 0,039x_1x_2$, де: y – вихідна величина (h – глибина очищення, мм); x_1 – перший фактор (V – швидкість подачі, м/хв); x_2 – другий фактор (S – натяг голкофрези, мм).

Рівняння регресії із натуральними значеннями має такий вигляд:

$$h = -0,97310 + 0,22602V + 0,84571S - 0,01125V^2 - 0,02222S^2 - 0,003095VS.$$

Інтерпретація всіх коефіцієнтів рівняння регресії у натуральних значеннях та аналіз впливу кожного із них на вихідну величину – глибину очищення h (мм), показав таке: лінійні ефекти V та S – показують безпосередній вплив факторів на h ; квадратичні ефекти V^2 та S^2 – показують нелінійність та оптимум; взаємодія VS – показує, як фактори впливають один на одного.

Аналіз лінійного коефіцієнта при V (+0,22602) показує таке: позитивний знак означає, що зі збільшенням V глибина очищення спочатку зростає. Це відображає фізичний ефект: при дуже малих швидкостях подачі оброблення "заминає" поверхню, і ефективність удару голок нижча. Після переходу за певну межу цей ефект нівелюється квадратичним членом $-0,01125V^2$. Аналіз лінійного коефіцієнта при S (+0,84571) показує таке: найбільший серед усіх коефіцієнтів ($>0,8$); показує, що натяг голкофрези є головним фактором, що визначає глибину очищення; фізично: чим більший S , тим глибше проникнення голок, а це означає інтенсивніше очищення.

Виявлено, що коефіцієнт при V^2 ($-0,01125$) з негативним знаком означає, що після певного значення швидкості глибина очищення починає зменшуватися. Це класичний ефект, оскільки в разі надто великих V голки не встигають вдарили поверхню достатньо глибоко. Отримано "параболічний" максимум в області 8-11 м/хв, що підтверджує припущення, що занадто велика швидкість погіршує очищення. Інший коефіцієнт при S^2 ($-0,02222$) є найбільшим із квадратичних членів (понад удвічі більший за V^2). Це означає, що надто великий натяг призводить до пошкодження поверхні, нерівномірності, різкого загасання ефективності. Модель прогнозує оптимум $S \approx 2,4-3,2$ мм. При $S > 4$ мм приріст глибини очищення зменшується.

Інтерпретація найважливішого коефіцієнта взаємодії VS ($-0,003095$) показує таке: якщо V висока, ефективність натягу зменшується; якщо S великий, збільшення швидкості дає менший приріст очищення; негативний знак означає конфлікт факторів на високих значеннях.

Отже, встановлено, що натяг голкофрези (S) – головний фактор, що визначає глибину поверхневого очищення заготовок із вживаної деревини, а швидкість по-

дачі (V) – другорядний, але значущий. Окрім цього, обидва фактори мають нелінійну дію, що створює оптимум, а їх взаємодія VS є негативною, тому у підсумку від їх надмірного зростання погіршується процес очищення. Раціональний режим очищення на верстаті: $8 \leq V \leq 11$ м/хв, $2,2 \leq S \leq 3,2$ мм.

Графік дає змогу візуально оцінити вплив обох факторів та їх взаємодію. Вплив швидкості подачі V на всіх трьох кривих демонструє однакову тенденцію: глибина очищення спочатку зростає (від 4 до 10 м/хв), досягає максимуму приблизно при $V = 10$ м/хв, далі зменшується (від 10 до 16 м/хв). Це класичний параболічний ефект, зумовлений балансом між: частотою ударів голок та часом контакту з поверхнею. При низьких V інтенсивність ударів ще недостатня, а при дуже високих V – не вистачає часу для достатньої глибини проникнення голок. Раціональна швидкість подачі ≈ 10 м/хв.

Вплив натягу голкофрези S виражений кривими, що мають чітко виражені рівні: найменша глибина – при $S = 0,6$ мм (діапазон значень дуже низький: 0,24; 0,64; 0,23 мм), а це означає: за малого натягу голки фактично тільки "скаблюють" поверхню, не проникаючи достатньо глибоко; середня глибина – при $S = 2,6$ мм значення зростають до $\sim 2,2$ мм і забезпечують стабільне очищення без руйнування деревини; найбільша глибина – при $S = 4,6$ мм (значення: 3,24; 3,56; 3,07 мм), а це відповідає інтенсивному ударному проникненню голок у деревину, що відображає домінуючу роль натягу S .

Графічну інтерпретацію результатів досліджень подано на рис. 1.

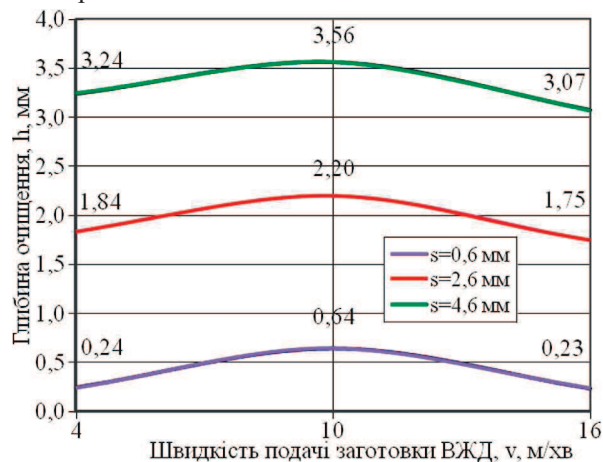


Рис. 1. Змінювання глибини очищення h (мм) залежно від швидкості подачі V (м/хв) для трьох характерних значень натягу голкофрези S (мм) / Change in cleaning depth h (mm) depending on feed rate V (mm/min) for three characteristic values of needle cutter tension S (mm)

Проведені експериментальні спостереження дали змогу комплексно оцінити вплив швидкості подачі заготовки та натягу голкофрези на глибину поверхневого очищення заготовок із вживаної деревини та виявити закономірності, що визначають ефективність цього процесу. На підставі отриманих результатів встановлено, що обидва фактори – швидкість подачі V та натяг голкофрези S – мають статистично значущий вплив на вихідний параметр h та формують характерну нелінійну залежність, описану моделлю другого степеня.

Дослідження показало, що натяг голкофрези є домінуючим фактором, що найбільшою мірою визначає глибину очищення. Збільшення S у межах від 0,6 до 4,6 мм призводить до істотного зростання величини h , за-

безпечуючи інтенсивне проникнення голок і ефективне видалення забруднень. Водночас, надмірно високі значення натягу можуть спричиняти підвищені напруження у поверхневому шарі деревини, появу мікропошкоджень та збільшення шорсткості. Швидкість подачі V також чинить помітний вплив на поверхнєве очищення заготовок із вживаної деревини, проте її дія є збалансованішою та слабшою порівняно з натягом. Глибина очищення зростає зі збільшенням швидкості подачі від 4 до 10 м/хв, що пояснюється зростанням частоти та кінетичної енергії ударів голок. Проте подальше підвищення V до 16 м/хв призводить до зменшення h , оскільки тривалість контакту інструмента з поверхнею скорочується й ефективність ударного впливу знижується.

Особливе значення має взаємодія факторів V/S , яка виявилася статистично значущою та негативною за знаком. Це свідчить про те, що надмірне збільшення швидкості подачі зменшує ефективний внесок натягу в процес поверхневого очищення заготовок із вживаної деревини, а великі значення S погіршують дію V за високих швидкостей. Саме взаємодія факторів формує поверхню відгуку з вираженим оптимумом.

Графічна інтерпретація впливу швидкості подачі V (м/хв) та натягу голкофрези S (мм) на вихідну величину підтверджує максимальні значення глибини очищення h (мм) при $V \approx 10$ м/хв та середніх значеннях натягу (2-3 мм). Усі три експериментальні криві (для $S = 0,6; 2,6; 4,6$ мм) мають параболічний характер, що узгоджується з отриманою математичною моделлю (рис. 2).

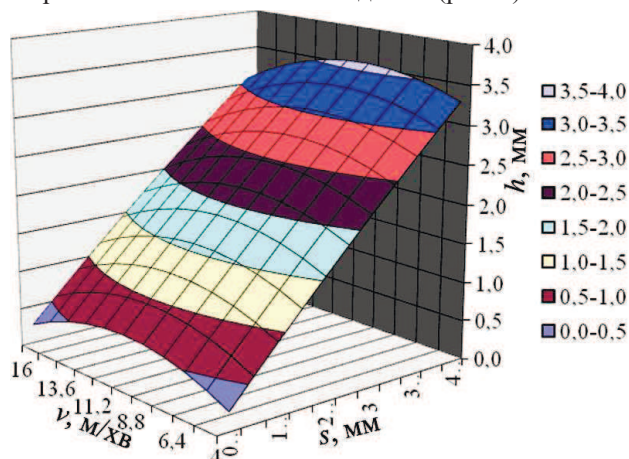


Рис. 2. Характер впливу швидкості подачі V (м/хв) та натягу голкофрези S (мм) на глибину очищення h (мм) / The nature of the influence of the feed speed V (m/min) and the needle cutter tension S (mm) on the cleaning depth h (mm)

Найвища ефективність досягається за поєднання середніх значень V і S , тоді як крайні комбінації параметрів призводять до зменшення результативності або надмірного зняття поверхні. Отже, результати проведеного експерименту дають змогу зробити висновок, що процес голкофрезерного очищення вживаної деревини має чітко виражений нелінійний та взаємозалежний характер, а раціональні режими його роботи перебувають у межах: $V = 8-11$ м/хв, $S = 2,2-3,2$ мм. Саме ці режими забезпечують достатню глибину поверхневого очищення заготовок із вживаної деревини, стабільність результатів, мінімальні втрати матеріалу та раціональне навантаження на інструмент. Сформовані закономірності та отримане рівняння регресії є основою для подальшого вдосконалення режимів роботи голкофрезерних верста-

тів, розроблення автоматизованих систем керування та впровадження цифрових рішень відповідно до концепції Industry 5.0 та циркулярної економіки.

Обговорення результатів дослідження. Отримані результати регресійного аналізу та проведеного натурального експерименту узгоджуються із сучасними науковими уявленнями про механічне та ударно-різальне очищення вживаної деревини. Аналіз глибини очищення залежно від швидкості подачі та натягу голкофрези показав нелінійний характер процесу та наявність чіткої області оптимуму – висновки, які підтверджуються низкою сучасних досліджень.

Результати цієї роботи добре корелюють із експериментальними спостереженнями [43], де під час фрезерування соснової деревини також виявлено параболічний характер впливу швидкості подачі на параметри поверхні: за надмірно низьких швидкостей спостерігається недостатнє зрізання, а за високих – погіршується контакт інструмента з поверхнею. Це узгоджується з нашим висновком, що раціональний діапазон швидкості подачі $V = 8-11$ м/хв забезпечує найвищу ефективність очищення поверхні.

Важливо, що характер впливу натягу голкофрези (аналогічний контактному тиску інструмента) відповідає закономірностям, описаним у дослідженні [44], де автори довели, що збільшення тиску або глибини проникнення інструмента призводить до істотного збільшення глибини зрізання, однак надмірні значення зумовлюють пошкодження волокон і надлишкову шорсткість. Аналогічне явище зафіксовано й у нашій роботі при натягах $S > 3,5$ мм.

Отримані в дослідженні дані узгоджуються також із висновками [14], які експериментально вивчали голкофрезерне очищення вживаної деревини та визначили, що середні значення швидкості подачі та помірні значення натягу забезпечують найкраще видалення старих лакофарбових покриттів. Отримані результати підтверджують ці висновки та розширюють їх за рахунок розроблення повної регресійної моделі в натуральних значеннях.

У роботі [31] продемонстровано, що під час очищення деревини від старих покриттів найкращі результати досягаються за середніх параметрів подачі та помірного навантаження на інструмент, оскільки надмірний тиск або швидкість призводять до нерівномірного зрізання та підвищеної енергоємності процесу. Ці висновки повністю відповідають нашій ідентифікованій "зоні оптимуму".

У роботі [41] наведено особливості очищення екологічно стійких вогнезахисних та супергідрофобних покриттів для деревних матеріалів. Автори вважають, вогнезахисне покриття деревини з інтегрованими властивостями проти змочування, самоочищення та гарної стійкості до атмосферних впливів приділяється велика увага, що є життєво важливим для швидкого розвитку будівництва та будівельних матеріалів. Багатьма дослідниками створено супергідрофобне та вогнезахисне покриття на підставі трикомпонентного монокомпонентного спучуючого вогнезахисного матеріалу, полідиметилсилоксанової смоли та модифікованих наночастинок SiO_2 , яке потрібно очистити після його експлуатації. Таке покриття може надати деревним матеріалам високі вогнестійкість та самоочисні властивості. Порівняно з

чистою деревиною, деревина з обробленою поверхнею демонструє самозагасаючу поведінку у випробуванні на вертикальне горіння зі значно підвищеним граничним індексом кисню 31,0 % та рейтингом UL 94 V0. Проте, все це покриття є значною перепоною для подальшого очищення вживаної деревини.

Значущість квадратичних членів рівняння регресії та нелінійність процесу також підтверджуються моделями milling-процесів, які описано у роботі [36]. Автори визначили, що глибина проникнення та відгуки поверхні не змінюються лінійно з технологічними параметрами, що підтверджується структурою нашої моделі з домінуючими квадратичними коефіцієнтами.

Важливо відзначити, що складність очищення вживаної деревини пов'язана з її неоднорідністю та поверхневим старінням – це підтверджено оглядовою роботою [1], де вказано на те, що пост-споживча деревина має різний стан поверхні, й ефективне очищення потребує індивідуально підібраних режимів оброблення. Наше дослідження доповнює ці висновки кількісними залежностями й рекомендаціями для конкретного інструмента.

Загалом отримані у цій роботі результати дослідження підтверджують загальну тенденцію, характерну для сучасних наукових праць: ефективність механічного очищення вживаної деревини визначається узгодженим балансом швидкості її подачі, глибини проникнення інструмента та їх нелінійної взаємодії; надмірні або мінімальні значення параметрів знижують якість оброблення поверхні деревини. Побудоване рівняння регресії та отримані раціональні режими роботи обладнання ($V = 8-11$ м/хв, $S = 2,2-3,2$ мм) є узгодженими з цими закономірностями та можуть бути рекомендовані для практичного застосування у технологіях очищення вторинної деревини як сировини відповідно до вимог циркулярної економіки та підходів Industry 5.0.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – отримала подальший розвиток технологія голкофрезерного очищення поверхні заготовок із вживаної деревини, рівняння регресії якої кількісно описує вплив швидкості подачі та натягу голкофрези на глибину видалення поверхневого шару, що забезпечує максимальну ефективність видалення забруднень без пошкодження структури деревини.

Практична значущість результатів дослідження – розроблену технологію можна використати для впровадження раціональних режимів голкофрезерного очищення заготовок із вживаної деревини у виробничі процеси, оскільки отримане рівняння регресії дає змогу точно прогнозувати глибину видалення поверхневих забруднень, забезпечувати стабільну якість підготовки деревини до подальших операцій склеювання чи фрезерування, врегулювати навантаження на інструмент та енергоспоживання обладнання.

Висновки / Conclusions

Побудовано рівняння регресії, яке описує залежність глибини поверхневого очищення заготовок із вживаної деревини від режимів роботи голкофрезерного верстата, що забезпечує максимальне видалення забруднень без надмірної втрати матеріалу, а також дає змогу визначити ефективність виконання цієї операції.

За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. На підставі експериментальних даних побудовано адекватну регресійну модель другого степеня в натуральних технологічних змінних, яка кількісно описує вплив швидкості подачі V та натягу голкофрези S на глибину очищення h поверхні заготовок із вживаної деревини.
2. Встановлено, що натяг голкофрези є домінуючим фактором, який найбільше впливає на ефективність очищення вживаної деревини; лінійний коефіцієнт при S є найбільшим за абсолютним значенням, що підтверджує визначальну роль цього параметра у формуванні глибини видаленого шару.
3. З'ясовано, що швидкість подачі заготовок із вживаної деревини чинить параболічний вплив на процес поверхневого очищення цих заготовок: глибина h зростає до значень $V \approx 10$ м/хв, після чого зменшується через скорочення тривалості контакту інструмента з поверхнею.
4. Виявлено значущий негативний вплив взаємодії факторів $V \cdot S$, який зумовлює сідлоподібний характер поверхні відгуку та пояснює взаємне зниження ефективності параметрів за їхніх надмірних значень.
5. Графічна інтерпретація моделі підтвердила існування чіткої зони раціональних режимів голкофрезерного поверхневого очищення для заготовок із вживаної деревини, обмеженої діапазонами $V = 8-11$ м/хв та $S = 2,2-3,2$ мм, у якій забезпечується максимальна глибина видалення забруднень без надмірного пошкодження поверхневого шару деревини.
6. Порівняння з результатами інших авторів засвідчило узгодженість отриманих закономірностей із відомими характеристиками ударно-різальної взаємодії інструментів із деревиною та підтвердило наукову достовірність моделі, побудованої саме для умов очищення вживаної деревини.
7. Отримані результати можна використати для вдосконалення режимів роботи голкофрезерного устаткування, розроблення технологічних карт, розроблення автоматизованих систем керування, цифрових двійників процесу та впровадження технологій оброблення вторинної деревної сировини у межах концепцій циркулярної економіки та Industry 5.0.

References

1. Besserer, A., Troilo, S., Girods, P., Rogaume, Y., & Brosse, N. (2021). Cascading recycling of wood waste: A review. *Polymers*, 13(11), article ID 1752. <https://doi.org/10.3390/polym13111752>
2. Brischke, C., Meyer-Veltrup, L., & Alfredsen, G. (2018). Performance of aged and reused timber: Material characteristics and challenges for reuse. *Wood Material Science & Engineering*, 13(3), 137–146. <https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1360190>
3. Frihart, C. R., & Hunt, C. G. (2019). Adhesives with wood materials: Bond formation and performance. In *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (2nd ed.). CRC Press, pp. 10.1–10.24. <https://doi.org/10.1201/9780429444151-7>
4. Gayda, S. V. (2007). A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 60–63. <https://doi.org/10.36930/42073314>
5. Gayda, S. V. (2016). Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle – milling tools. *Bulletin of KhNTUA*, 178, 3–11. [In Ukrainian]. URL: <https://repo.btu.kharkiv.ua/items/1cd3f001-fcc1-4b17-8b02-c81061b98bb3>
6. Gayda, S. V. (2017). Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 43, 5–20. <https://doi.org/10.36930/42174301>
7. Gayda, S. V. (2019). Scientific and technical basis of the use of used wood in woodworking: thesis of the Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23.06. Lviv: UNFU, 465 p. [In Ukrainian]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1vwVTBx9l6K9D1kq1Ji9rFmLpHOysCH8P/view>

8. Gayda, S. V. (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99–114. <https://doi.org/10.36930/42234908>
9. Gayda, S. V. (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 4–15. <https://doi.org/10.36930/42245001>
10. Gayda, S. V. (2025). Analysis of trends in the production volumes of construction materials in Ukraine and Europe. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 33–48. <https://doi.org/10.36930/42255103>
11. Gayda, S. V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 4–16. <https://doi.org/10.36930/42255101>
12. Gayda, S. V., & Bilyy, Ya. M. (2016). The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 42, 69–79. <https://doi.org/10.36930/42164211>
13. Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW – made blockboards. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 17, 185–192. <https://doi.org/10.15421/411834>
14. Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2020). Determining the regime parameters for the surface cleaning of post-consumer wood by a needle-milling tool. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1), 89–97. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>
15. Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2021). Properties of used wood as a determining factor in the quality of furniture products. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 23, 152–162. <https://doi.org/10.15421/412135>
16. Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(212), article ID 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>
17. Gayda, S. V., & Kyryanka, V. V. (2025). Development of approaches for the utilization of wood residues and waste from the processing of wood and composite structural materials in furniture manufacturing at LLC "Fortuna – Mebli". *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 109–123. <https://doi.org/10.36930/42255108>
18. Gayda, S. V., & Lesiv, L. E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33–47. <https://doi.org/10.36930/42234903>
19. Gayda, S. V., & Medvid, L. V. (2024). Construction of the mathematical model of the strength of post-consumer wood made blockboard of different designs. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 27, 189–198. <https://doi.org/10.15421/412424>
20. Gayda, S. V., Kushpit, A. S., & Huber, Yu. M. (2023). Analysis of implementation of Industry 4.0 principles in furniture production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 73–84. <https://doi.org/10.36930/42234906>
21. Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, article ID 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
22. Hernández, R. E., Koubaa, A., & Gendron, G. (2014). Influence of cutting parameters on surface quality of wood machined by peripheral milling. *Wood Science and Technology*, 48(5), 995–1013. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0648-9>
23. Koubaa, A., Hernández, R. E., & Fortin, Y. (2008). Predicting wood machining properties using regression and RSM models. *Wood and Fiber Science*, 40(4), 620–633. URL: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1187>
24. Lesiv, L. E. (2022). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 69–86. <https://doi.org/10.36930/42214806>
25. Lopes Silva, D. A., & Pigosso, D. C. A. (2020). Circular economy implementation in the wood industry: A systematic review of challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120–139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120-139>
26. Lutsenko, A. O. (2024). Ensuring effective symbiosis of the Imos program with flexible automated furniture production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 77–93. <https://doi.org/10.36930/42245007>
27. Medvid, L. V. (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 91–104. <https://doi.org/10.36930/42184412>
28. Medvid, L. V. (2021). Post – consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34–46. <https://doi.org/10.36930/42214706>
29. Medvid, L. V. (2025). Creation of an algorithm for forming the stages of the technological process for manufacturing blanks for blockboards from post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 64–79. <https://doi.org/10.36930/42255105>
30. Medvid, L. V., & Gayda, S. V. (2023). Determination of the strength indicators of normal blockboard made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 85–98. <https://doi.org/10.36930/42234907>
31. Molina, J., Herrera, P., & Martínez, R. (2021). Removal efficiency of aged coatings from reclaimed timber using controlled mechanical abrasion. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125138>
32. Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments. *John Wiley & Sons*, 640 p. URL: https://www.academia.edu/65675640/The_Design_and_Analysis_of_Experiments
33. Müller, U., Sormann, A., & Schöffner, R. (2020). Dynamics and wear behaviour of multi-needle impact tools during wood surface processing. *Holzforschung*, 74(8), 708–717. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0178>
34. Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
35. Nahavandi, S. (2019). Digital twins: A framework for future industrial environments. *IEEE Access*, 7, 119–124. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2891742>
36. Panjaitan, T., & Abdullah, S. (2021). Relationship between feed rate, cutting velocity and penetration depth in low-density wood milling. *BioResources*, 16(2), 3401–3419. <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.3401-3419>
37. Porankiewicz, B., Górski, J., Tanaka, C., & Ohta, M. (2015). Tool wear evolution and surface formation during milling of wood. *BioResources*, 12(4), 7943–7954. <https://doi.org/10.15376/biores.12.4.7943-7954>
38. Sandberg, D. (2020). Additive and subtractive manufacturing and the circular use of wood: A review. *Wood Material Science & Engineering*, 17(3), 176–188. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1843836>
39. Sandberg, D., Haller, P., & Navi, P. (2017). Thermo-hydro-mechanical modification of wood: Processes, principles and products. *Wood Science and Technology*, 50(3), 499–527. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0890-8>
40. Szwajka, K., & Trzepieciński, T. (2016). Effect of tool material on tool wear and delamination in machining wood – based panels. *Journal of Wood Science*, 62, 305–315. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1555-6>
41. Sun, Ren-Yi, Wang, Fang, Li, Chun-Bo, et al. (2023, August). Formulation of environmentally robust flame-retardant and superhydrophobic coatings for wood materials. *Construction and Building Materials*, vol. 392, article ID 131873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131873>
42. Werner, F., & Richter, K. (2007). Wooden building products in comparative LCA: A literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(7), 470–479. <https://doi.org/10.1065/lca2007.02.306>

43. Yang, C., Ma, Y., Liu, T., Ding, Y., & Qu, W. (2023). Experimental Study of Surface Roughness of Pine Wood by High-Speed Milling. *Forests*, 14(6), article ID 1275. <https://doi.org/10.3390/f14061275>
44. Yildiz, S., & Göker, Y. (2018). Influence of cutter pressure and tool – surface interaction on wood removal efficiency during mechanical processing. *Holzforschung*, 72(7), 593–602. <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0157>
45. Zhang, X., Fu, Y., Wang, J., & Chen, L. (2018). Modeling wood removal and needle impact interaction in hybrid abrasive-cutting tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.006>

S. V. Gayda, L. V. Medvid

Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

ESTABLISHING THE DEPENDENCE OF THE SURFACE-CLEANING DEPTH OF POST-CONSUMER WOOD BLANKS ON THE OPERATING PARAMETERS OF A NEEDLE-MILLING MACHINE

The article presents the results of a comprehensive experimental study of the surface cleaning process of post-consumer wood blanks using a needle-milling method under variation of two key technological parameters: the feed speed of the workpiece within the range of 4-16 m/min and the penetration (tension) of the needle cutter in the range of 0.6-4.6 mm. Based on the experimental data, a second-order regression equation in natural variables was developed, which reflects the quantitative influence of these parameters on the depth of surface-layer cleaning of post-consumer wood blanks and makes it possible to determine rational operating modes of the needle-milling machine. It was established that the penetration depth of the needle cutter is the dominant factor, as it ensures an increase in the intensity of needle penetration into the contaminated wood surface and the efficiency of removing aged coating residues and operational contaminants accumulated during long-term service life. The feed speed demonstrates a parabolic effect: the depth of surface cleaning increases up to approximately $V \approx 10$ m/min and decreases thereafter due to the reduced contact time between the tool and the wood surface. The identified negative interaction coefficient VS confirms the presence of a mutual damping effect between the factors, which determines the formation of a limited rational zone of technological parameters – operating regimes of the needle-milling machine, within which maximum cleaning efficiency is achieved without excessive damage to the wood surface layer. Based on the analysis of experimental data, graphical interpretation, and the constructed model, the rational cleaning parameters were determined as $V = 8-11$ m/min and $S = 2.2-3.2$ mm. Comparison of the obtained results with studies by other researchers confirmed their scientific reliability and the consistency of the identified patterns. The study has practical significance for improving technologies for processing post-consumer wood, enhancing the quality of workpiece preparation prior to bonding, and supporting the implementation of circular-economy principles and the Industry 5.0 concept in modern wood-processing operations. The obtained results can be used to improve the operating modes of needle-milling equipment during the cleaning of surfaces made from post-consumer wood with varying degrees of contamination.

Keywords: blockboard; wooden blanks; needle milling tool; surface coating contamination; circular economy; structural wood materials.