

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ лісового і садово-паркового господарства**

**ПОГОДЖЕНО  
Директор ННІ**

Лісового і садово паркового  
господарства  
\_\_\_\_\_ Роман ВАСИЛИШИН  
(підпис) (ПІБ)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри**

Технологій та дизайну виробів з  
деревини  
\_\_\_\_\_ Андрій СПІРОЧКІН  
(підпис) (ПІБ)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему Аналіз впливу режимів обробки на фрезерних верстатах з ЧПК на якість деталей меблів Монтессорі**

Спеціальність 187 «Деревообробні та меблеві технології»

Освітня програма «Деревообробні та меблеві технології»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

**Гарант освітньої програми**

канд. техн. наук, доц. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Андрій СПІРОЧКІН  
(ПІБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

канд. техн. наук, доц. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Андрій СПІРОЧКІН  
(ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олександр ЦІЛУЙКО  
(ПІБ)

**Київ – 2025 рік**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ лісового і садово-паркового господарства**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

Технологій та дизайну виробів з деревини

к.т.н., доц. \_\_\_\_\_ Андрій СПІРОЧКІН

науковий ступінь, вчене звання (підпис)

(ПІБ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
СТУДЕНТУ**

\_\_\_\_\_ Цілуйку Олександрю Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 187 «Деревообробні та меблеві технології»

(код і назва)

Освітня програма «Деревообробні та меблеві технології»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Аналіз впливу режимів обробки на фрезерних верстатах з ЧПК на якість деталей меблів Монтессорі

затверджена наказом ректора НУБіП України від “05” 11 2024 р. № 1978 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру \_\_\_\_\_

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи

Звіти з наукової роботи кафедри. Результати попередніх експериментальних досліджень за обраною тематикою

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз матеріалів, що використовуються для виготовлення меблів Монтессорі;
2. Аналіз режимів обробки, що використовуються під час виготовлення меблів Монтессорі
3. Дослідження впливу режимів обробки на якість виробів.

Дата видачі завдання “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

( підпис )

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

( підпис )

(прізвище та ініціали студента)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ТА ЯКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ.....	8
1.1. Аналіз сучасного стану деревообробних технологій та специфічних вимог до якості меблів Монтесорі.....	8
1.2. Фізико-механічні властивості деревинних плит (Фанера та МДФ) та теоретичні основи процесу фрезерування.....	11
1.3. Аналіз впливу режимних параметрів на якість обробки плитних матеріалів .....	14
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	17
1.1. Опис властивостей обраного обладнання.....	17
1.2. Прийняття проектного рішення.....	24
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	41
3.1. Планування багатофакторного експерименту та визначення незалежних факторів і їхніх рівнів.....	41
3.2. Розробка критеріїв оцінки якості. Обґрунтування візуально-тактильного контролю та формалізація інтегральної оцінки якості поверхні.....	44
3.3. Методика проведення експерименту, збору та статистичної обробки даних .....	46
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	49
4.1. Аналіз експериментальних результатів інтегральної оцінки якості деталей з фанери.....	49
4.2. Побудова математичних моделей, оптимізація режимів фрезерування та розробка технологічних рекомендацій.....	51
4.3. Техніко-економічне обґрунтування та заходи з охорони праці.....	54
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

## РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Основна частина викладена на 65 сторінках, проілюстрована 6 рисунками та 29 таблицями. Список використаних джерел містить 53 найменування.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, викликану високими вимогами до якості обробки березової фанери при виробництві меблів Монтезорі. Визначено, що оптимізація технологічних режимів фрезерування є необхідною для мінімізації макродефектів та зниження витрат на фінішну обробку. Метою дослідження є експериментальне визначення та оптимізація режимів фрезерування на верстатах з ЧПК для досягнення максимальної інтегральної оцінки якості поверхні (ІОЯП).

У першому розділі проведено огляд теоретичних основ різання фанери та проаналізовано вплив основних кінематичних параметрів різання: частоти обертів шпинделя, робочої подачі та подачі на зуб, на формування якості обробленої поверхні. Обґрунтовано, що для фанери найбільшу небезпеку становлять макродефекти (сколи, вириви, ворсистість), які традиційні показники шорсткості відображають не повною мірою.

У другому розділі обґрунтовано вибір промислового обладнання для проведення експериментів. Основною експериментальною базою визначено обробний центр з ЧПК KDT KN-3710DE Delta, оснащений високочастотним шпинделем (до 24 000 об/хв), що дозволяє реалізувати високошвидкісні режими. Як різальний інструмент обґрунтовано використання стандартної твердосплавної компресійної фрези з трьома різальними зубам, яка є типовою для розкрою плитних матеріалів.

У третьому розділі обґрунтовано критерій оптимізації: інтегральна оцінка якості поверхні (ІОЯП), отриманий на основі візуально-тактильного контролю з використанням 5-бальної експертної шкали. Розроблено повний факторний план експерименту типу із триразовою повторністю. Описано процедуру збору даних

та їхню первинну статистичну обробку, включаючи перевірку однорідності дисперсій та дисперсійний аналіз (ANOVA).

У четвертому розділі побудовано адекватну поліноміальну регресійну модель другого порядку. Застосовано Методологію поверхні відгуку (RSM) для аналітичного визначення абсолютного оптимуму якості. Встановлено, що теоретичний максимальний бал якості (4.88) досягається при попутному фрезеруванні, максимальних обертах (24 000 об/хв) та оптимальній подачі 6810 мм/хв. Сформульовано чіткі технологічні рекомендації для виробництва та надано техніко-економічне обґрунтування, підкреслюючи значне зниження браку та мінімізацію витрат на фінішне шліфування.

Ключові слова: фрезерування, ЧПК, фанера, якість поверхні, ІОЯП, оптимізація, методологія поверхні відгуку.

## ВСТУП

Сучасне меблеве виробництво, особливо у сегменті спеціалізованих виробів (наприклад, меблів за методикою Монтесорі), висуває високі вимоги до точності, складності форм та якості кінцевої обробки деталей. Виготовлення таких виробів неможливе без застосування високоточних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Фанера, як багат шаровий та анізотропний деревинопохідний матеріал, є одним із найпоширеніших матеріалів у цій галузі завдяки своїй міцності та екологічності. Проте, її шарувата структура є джерелом значних технологічних проблем під час фрезерування, головною з яких є утворення сколів, виривів та підвищеної шорсткості на крайках.

Оскільки якість поверхні та кромки безпосередньо впливає на необхідність подальшої дороговартісної та трудомісткої операції шліфування, пошук оптимальних режимів різання, що забезпечують максимальну якість за один прохід, набуває критичного техніко-економічного значення. Існуючі рекомендації для фрезерування деревини часто не враховують складну структуру фанери, що призводить до використання неоптимальних режимів на виробництві, значного рівня браку та перевитрат часу.

Метою кваліфікаційної роботи є встановлення та наукове обґрунтування оптимальних технологічних параметрів фрезерування деталей із фанери на верстатах із ЧПК для досягнення максимальної інтегральної оцінки якості поверхні (ІОЯП) та розробка практичних виробничих рекомендацій.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

1. Розробити план факторного експерименту для кількісної оцінки впливу основних параметрів різання (частоти обертів шпинделя, робочої подачі та напрямку фрезерування).
2. Провести експериментальні дослідження та здійснити статистичний аналіз отриманих даних за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA), встановивши ступінь значущості кожного фактора.

3. Побудувати поліноміальну математичну модель, що описує залежність ІОЯП від технологічних режимів.

4. Застосувати методологію поверхні відгуку для аналітичного пошуку оптимальної комбінації параметрів, що максимізує якість обробки.

5. Розробити практичні рекомендації для впровадження оптимальних режимів фрезерування у виробництво та обґрунтувати їхню техніко-економічну ефективність.

Об'єкт дослідження – процес фрезерування березової фанери для деталей меблів Монтессорі на верстаті з числовим програмним керуванням.

Предмет дослідження – вплив змінних режимів різання, а саме: частоти обертів шпинделя ( $n$ ), робочої подачі ( $V_f$ ) та напрямку різання (зустрічне/попутне), на Інтегральну оцінку якості поверхні (ІОЯП) деталей.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні та верифікації адекватної математичної моделі другого порядку, яка кількісно описує нелінійну взаємодію ключових технологічних факторів при високошвидкісному фрезеруванні фанери. Вперше для даного типу матеріалу та обладнання точно визначено абсолютний теоретичний оптимум режимів, що гарантує досягнення максимальної якості при мінімальних витратах часу.

Результати дослідження мають безпосередню практичну цінність для деревообробних підприємств, що спеціалізуються на виготовленні меблів з високими вимогами якості на верстатах з ЧПК. Впровадження розроблених оптимальних режимів дозволить:

- Знизити рівень браку деталей на 5-10% за рахунок мінімізації дефектів (сколів та виривів).
- Підвищити продуктивність при збереженні високої якості.
- Скоротити виробничі витрати завдяки виключенню або значному скороченню операцій ручного або механічного шліфування перед фінішним оздобленням.

## РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ТА ЯКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ

1.1. Аналіз сучасного стану деревообробних технологій та специфічних вимог до якості меблів Монтессорі

Обробні центри з числовим програмним керуванням (ЧПК) є найвищим рівнем технологічного розвитку сучасної деревообробної промисловості, знаменуючи перехід до принципів Індустрії 4.0. Їхня зростаюча роль є стратегічною відповіддю на два ключові виклики: економічну потребу в гнучкості виробництва та технологічну необхідність у стабільно високій якості обробки складних матеріалів.

На відміну від класичних верстатів, ЧПК забезпечує не просто швидкість, а абсолютний інженерний контроль над основними фізичними параметрами різання:

1. Точне керування параметрами різання ( $f_z$  і  $n$ ):
  - Якість поверхні (шорсткість  $R_a$ ) у фрезеруванні прямо залежить від подачі на зуб, що є товщиною зрізу, залишеною одним лезом. ЧПК дозволяє точно задавати та стабільно підтримувати швидкість робочої подачі та частоту обертів шпинделя, тим самим контролюючи за формулою (1.1)[34]:

$$f_z = \frac{V_f}{Z \cdot n}, \quad (1.1)$$

де  $f_z$  – подачі на зуб;

$V_f$  – робочої подачі;

$Z$  – кількість зубів інструменту;

$n$  – обертів шпинделя.

Дослідження “Pelit et al., 2021” [44] підтверджують, що  $f_z$  є найвпливовішим фактором на шорсткість. Зростання ролі ЧПК – це зростання ролі математично обґрунтованого вибору режиму [20] різання, що дозволяє досягати чистової обробки, недоступної при ручному управлінні.

2. Компенсація складності матеріалів.

- ЧПК є незамінним при обробці плитних матеріалів (Фанера, МДФ) [23,51], які створюють значні технологічні виклики. Наприклад, фанера є анізотропним та шаруватим матеріалом, де сили різання можуть значно перевищувати сили різання для масиву деревини [15]. Ці високі сили провокують вириви та сколи на кромках.

- ЧПК забезпечує достатню жорсткість конструкції (масивна станина, потужна портална система), необхідну для пригнічення вібрацій, що викликаються цими високими силами. Це єдиний спосіб виконати чисте контурне різання [26].

### 3. Управління тепловим режимом.

- Надмірні оберти ( $n$ ) при низькій подачі ( $V_f$ ) можуть призводити до тертя, перегріву та термічних дефектів (підпалів), особливо на МДФ [30]. ЧПК дозволяє точно виставити оптимальне співвідношення  $n$  та  $V_f$  для розсіювання тепла, запобігаючи незворотним дефектам, які є неприпустимими у фінішних виробках.

Зростання ролі ЧПК також є економічно зумовленим, оскільки дозволяє виробникам адаптуватися до мінливих ринкових моделей:

1. Масова Кастомізація. Сучасний споживач вимагає індивідуальних рішень. ЧПК-технологія дозволяє виробнику виконувати швидко переналаштування (завантаження нового G-коду) без значних механічних простоїв. Це робить економічно вигідним випуск навіть найменших, індивідуальних партій, що є ідеальною моделлю для нішового ринку, яким є меблі Монтесорі.

2. Оптимізація та ефективність використання матеріалу. Інтеграція ЧПК з CAD/CAM-системами забезпечує високоефективну розкладку деталей на стандартних листах Фанери, що мінімізує виробничі відходи. Це безпосередньо знижує собівартість продукції.

3. Стабільна якість і зниження браку. Мінімізація впливу людського фактора та стабільний контроль режимів забезпечують високу повторюваність

якості. Це, у свою чергу, знижує відсоток браку і, як наслідок, експлуатаційні витрати, підвищуючи довіру споживачів.

Вимоги до якості меблевих виробів у контексті Монтессорі-педагогіки є значно суворішими, ніж галузеві стандарти, оскільки меблі є не просто функціональним об'єктом, а невід'ємною складовою «підготовленого середовища» [3]. Це середовище має максимально сприяти самостійному розвитку, концентрації та сенсорному сприйняттю дитини. Відповідно, технологічна якість обробки набуває набагато вищого значення.

Критерій безпеки та цілісності кромки – це першочерговий критерій, що вимагає нульової дефектності, що може становити фізичну небезпеку.

1. Повна відсутність травмонебезпечних дефектів. Меблі повинні мати ідеально гладкі, закруглені кромки без виривів волокон, сколів або задирок [1].

Фанера, як анізотропний багатошаровий матеріал, схильна до утворення виривів на виході інструменту через відмінності в орієнтації волокон у сусідніх шарах. Як доведено “Atanasov, 2021”[15], високі сили різання в фанері підвищують ризик цих структурних пошкоджень.

2. Вимога до мікрогеометрії кромки. Необхідна стабільно висока якість обробки на мікрорівні, що гарантує цілісність поверхні навіть після тривалої експлуатації та контакту з дитиною.

Якість поверхні безпосередньо впливає на нейросенсорний розвиток дитини. Грубість, ворсистість або хвилястість створюють сенсорний дискомфорт і відволікають від навчального процесу[3].

3. Тактильна гладкість. Поверхня повинна бути ідеально фінішною, без ворсистості (що часто є проблемою Фанери та МДФ при неоптимальному різанні) та слідів подачі інструменту. Це особливо критично для виробів, призначених для дітей з особливими освітніми потребами, де підвищені вимоги до тактильної стимуляції [3].

4. Візуальна чистота. Поверхня має бути однорідною, без різких перепадів кольору чи текстури, які можуть виникнути внаслідок нерівномірного фрезерування або вищезгаданих підпалів.

Традиційні інструментальні метрики шорсткості, такі як середнє арифметичне відхилення профілю ( $R_a$ ) або висота нерівностей профілю за десятьма точками ( $R_z$ ), є важливими, але недостатніми для оцінки меблів Монтессорі.

- $R_a$  та  $R_z$  кількісно вимірюють висоту мікронерівностей, але вони не враховують комплексної якості дефектів, таких як:
  - Наявність глобального сколу (макродефекту).
  - Ступінь ворсистості (мікроструктурний дефект).
  - Присутність термічних підпалів (хімічний дефект).

Саме тому, для об'єктивного оцінювання відповідності виробів високим сенсорним та безпековим критеріям, в роботі застосовується інтегральна оцінка якості поверхні (ІОЯП) [33,35]. Це формалізований метод експертних оцінок, який дозволяє фахівцям за допомогою стандартизованої бальної шкали систематизувати та кількісно виразити загальну якість деталі, включаючи її тактильні, візуальні та структурні характеристики. Це єдиний спосіб знайти оптимальні технологічні режими, що забезпечують не просто низький, а максимальний ступінь придатності виробу до використання в чутливому Монтессорі-середовищі.

1.2. Фізико-механічні властивості деревинних плит (Фанера та МДФ) та теоретичні основи процесу фрезерування

Фанера є композитним багат шаровим матеріалом, що виготовляється шляхом склеювання непарної кількості шарів луценого шпону, в яких волокна суміжних шарів розташовані перпендикулярно один до одного [51]. Така унікальна структура визначає її специфічні фізико-механічні властивості, які є критичними при високошвидкісній обробці на верстатах із ЧПК.

На відміну від ізотропного МДФ або однорідного масиву деревини, фанера є явно анізотропною у площині листа. Зміна напрямку волокон у кожному шарі забезпечує високу міцність на вигин та розтяг у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Однак, при фрезеруванні кромки, інструмент постійно перетинає волокна, орієнтовані як уздовж (паралельно осі різання), так і впоперек (перпендикулярно осі різання). Ця неоднорідність є основною причиною нестабільного процесу стружкоутворення та формування дефектів [23].

Фанера містить клейові шари (зазвичай на основі карбамідних або фенолформальдегідних смол), які мають значно вищу абразивність та твердість, ніж сама деревина. Різання цих шарів призводить до підвищеного зносу різального інструменту та збільшення теплового навантаження в зоні різання.

Шарувата структура робить фанеру особливо вразливою до відшарування та виривів волокон на крайках. Коли різальний інструмент виходить з матеріалу, він може не стільки зрізати, скільки відколювати волокна, не повністю склеєні або притиснуті до сусіднього шару. Це є прямим порушенням критерію безпеки меблів Монтесорі.

Теоретичні основи процесу фрезерування кінцевими фрезами ґрунтуються на кінематиці різання, механізмі стружкоутворення та аналізі сил різання.

При фрезеруванні, різальний елемент інструменту формує поверхню обробки шляхом зняття шару матеріалу у вигляді стружки. Геометрична якість обробленої поверхні (первинна шорсткість) є прямим наслідком кінематики руху (1.2):

$$R_{a,kin} \propto f_z^2 \quad (1.2)$$

де  $R_{a,kin}$  – кінематична шорсткість;

$f_z$  – подача на зуб (товщина стружки).

Таким чином, подача на зуб ( $f_z$ ) (рис.1.1) є головним інженерним параметром, який безпосередньо контролюється ЧПК-системою та визначає профіль поверхні. Зростання призводить до збільшення висоти гребенів і, як

наслідок, до підвищення шорсткості [44] як у роботі Pelit H., Korkmaz M., Budakçı M., 2021.

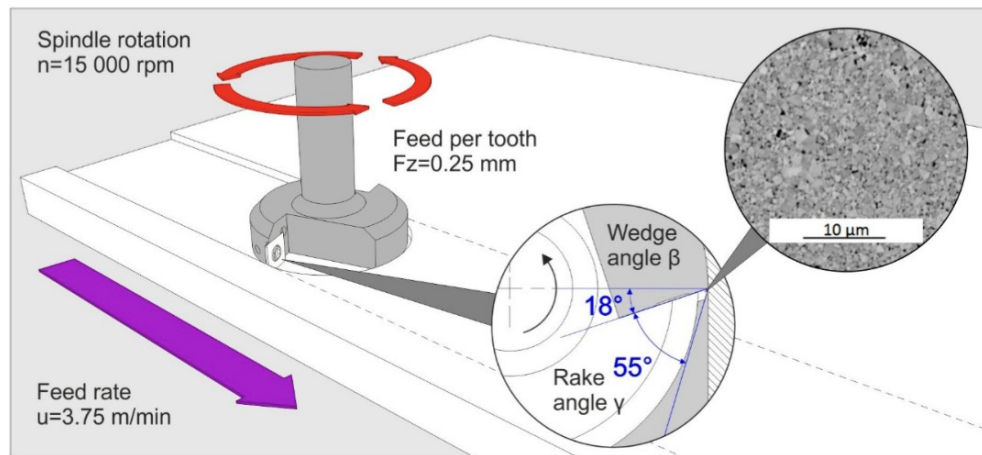


Рис. 1.1. Схема подачі на зуб [44]

Сили (1.3), що виникають у процесі фрезерування, є ключовою характеристикою для оцінки навантаження на інструмент, верстат і деталь. Вони визначають стабільність процесу та ризик утворення дефектів:

$$F_c = k \cdot f_z^2 \cdot h_\omega^y \cdot Z \quad (1.3)$$

де  $F_c$  – головна сила різання.

$k$  – коефіцієнт, що залежить від матеріалу.

$h_\omega$  – глибина різання.

$Z$  – показники ступеня та кількість зубів.

“Дослідження, проведені В. Атанасовим, показали, що сили різання при фрезеруванні фанери ( $\approx 46,9\text{ Н}$ ) значно перевищують аналогічні сили для масиву деревини (наприклад, дуб  $\approx 22,4\text{ Н}$ )” [15]. Це пояснюється тим, що інструмент повинен не лише зрізати волокна, а й долати опір клейових прошарків та структуру волокон, розташованих під кутом до напрямку подачі.

Наслідок високих сил.

1. Висока сила збільшує ймовірність відколу волокон на кромці фанери, особливо при різанні в напрямку, що призводить до тангенціального розколу шару.

2. Значні сили можуть викликати динамічні вібрації системи ЧПК, які збільшують фактичну шорсткість понад кінематичний розрахунок.

Через анізотропну структуру фанери, напрямок різання відіграє вирішальну роль у формуванні якості кромки [25].

Попутне та Зустрічне фрезерування.

- При зустрічному фрезеруванні інструмент ріже проти напрямку подачі, що часто призводить до підняття волокон.
- При попутньому фрезеруванні інструмент вривається у матеріал, притискаючи його до основи.

Для мінімізації виривів на верхній і нижній кромках фанери критично необхідне використання компресійних фрез [52]. Їхня геометрія забезпечує одночасне притискання волокон до основи на обох поверхнях, що є технологічною відповіддю на структурні недоліки матеріалу.

Технологічні дефекти (вириви, ворсистість) при фрезеруванні фанери є прямим наслідком її анізотропної структури та високих сил різання. Оптимізація якості поверхні для вимог Монтессорі-меблів вимагає точного налаштування кінематичних параметрів ( $f_z$  і  $n$ ) на верстатах ЧПК для мінімізації негативних ефектів цих фізико-механічних властивостей.

1.3. Аналіз впливу режимних параметрів на якість обробки плитних матеріалів

Якість обробленої поверхні (особливо шорсткість та відсутність макродефектів) є інтегральною функцією, що залежить від матеріалу, інструменту та, найголовніше, технологічних режимних параметрів процесу фрезерування на верстатах із ЧПК. Основними незалежними змінними, які контролюються системою ЧПК і безпосередньо впливають на якість, є подача на зуб ( $f_z$ ) та частота обертів шпинделя ( $n$ ).

Подача на зуб ( $f_z$ ) є найбільш значущим режимним параметром, що визначає кінцеву якість обробленої поверхні. Вона являє собою товщину шару

матеріалу, який знімається кожним ріжучим елементом інструменту за один оберт.

Вплив на шорсткість ( $R_a$ ).

Наукові дослідження [43,23] однозначно підтверджують, що  $f_z$  є головною детермінантою кінематичної шорсткості.

Збільшення  $f_z$  призводить до пропорційного збільшення висоти нерівностей на поверхні та, відповідно, до погіршення шорсткості ( $R_a$  зростає). Це пояснюється тим, що при більшій подачі на зуб зростає висота гребенів, які залишаються між слідами послідовних зубів інструменту.

Вплив на сили різання ( $F_c$ ).

Згідно з теоретичними моделями та експериментами, сили різання ( $F_c$ ) мають пряму та виражену залежність від робочої подачі.

Збільшення робочої подачі веде до суттєвого зростання шорсткості поверхні. Хоча високі сили підвищують продуктивність, вони також збільшують динамічне навантаження на систему ЧПК, що може спричинити вібрації та, як наслідок, погіршення фактичної шорсткості та збільшення ризику виривів на анізотропній фанері.

Частота обертів шпинделя ( $n$ ) також впливає на кінцеву якість, хоча її вплив на шорсткість часто є менш вираженим, ніж у ( $V_f$ ).

Дослідження показали, що збільшення  $n$  (при фіксованому  $V_f$ ) призводить до зменшення  $f_z$  (згідно з формулою 1.1) та покращення шорсткості ( $R_a$  зменшується). Це відбувається за рахунок збільшення кількості ріжучих ударів на одиницю довжини обробки.

Вплив на тепловий режим (Ризик підпалів).

- Хоча високі  $n$  сприяють кращій чистоті обробки, надмірне збільшення у поєднанні з дуже низькою подачею  $f_z$  може призводити до тертя, а не ефективного різання. Це викликає локальний перегрів у зоні контакту інструменту та матеріалу.

- Цей тепловий ефект є критичним для фанери та МДФ, де може виникати термічна деструкція матеріалу та утворення підпалів [30]. Для забезпечення високої тактильної та візуальної досконалості (критерій ІОЯП) необхідно підтримувати оптимальний баланс і, щоб уникнути як виривів так і підпалів.

Окрім основних режимних параметрів, на якість критично впливають параметри інструменту та його взаємодія з матеріалом.

Вибір компресійної спіральної фрези для даного дослідження є прямим технологічним рішенням для подолання проблеми виривів на кромках плитних матеріалів.

- Компресійна геометрія поєднує висхідну спіраль у верхній частині та низхідну спіраль у нижній. Це забезпечує притискання волокон до серцевини матеріалу як на верхній, так і на нижній лицьовій поверхні листа. Це єдиний надійний спосіб забезпечити цілісність кромки фанери, що відповідає високим вимогам безпеки Монтессорі.

Напрямок різання. Анізотропія фанери робить процес різання залежним від кута орієнтації волокон відносно осі подачі. Встановлено, що зміна напрямку різання може суттєво змінювати шорсткість [25]. Це вимагає проведення експериментів з урахуванням оптимальної траєкторії руху фрези для мінімізації відколів.

Аналіз наукових джерел демонструє, що якість обробки плитних матеріалів на ЧПК є результатом комплексної взаємодії  $f_z$ ,  $n$  та геометрії інструменту.  $f_z$  є головним параметром, що контролює шорсткість та сили різання, тоді як  $n$  впливає на чистоту і тепловий режим.

Для забезпечення максимального інтегрального показника якості поверхні (ІОЯП), необхідного для меблів Монтессорі, недостатньо керуватися лише зниженням  $R_a$ . Потрібно емпірично визначити оптимальне співвідношення між  $f_z$  та  $n$ , яке мінімізує макродефекти (вириви, підпали), що є завданням експериментальної частини даної роботи.



## РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1. Опис властивостей обраного обладнання

Сьогодні ринок фрезерних верстатів з ЧПК різноманітний і пропонує широкий вибір моделей для різних завдань. Доступні верстати від різних виробників, які відрізняються за потужністю, розмірами робочого поля, швидкістю обробки та точністю.

1. Фрезерний верстат з ЧПК KN-3710DE (рис. 2.1) призначений для високошвидкісного фрезерування листових матеріалів (фанери, меблевої плити, ДСП, МДФ), різних композитних матеріалів і пластмас, а також м'якої і твердої деревини. Ефективно використовується в дрібносерійному і велико-серійному виробництві, може впроваджуватися в автоматичні лінії

Верстат оснащений сучасною системою ЧПК DELTA (Тайвань). Система ЧПК має широкий спектр прикладних функцій. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс дозволяє швидко підготувати персонал підприємства до програмування та роботи на верстаті.

Технічні характеристики:

- Система управління DELTA (Тайвань)
- Розмір столу, мм 3100x2150
- Відстань від носа шпинделя до поверхні столу, мм 72-252
- Шпиндель КДТ, 12 кВт, 24000 об/хв, затискач ISO-30
- свердлильна головка 10 вертикальних шпинделів, 1,7 кВт, 6000 об./хв
- Карусель для зміни інструменту на 12 місць
- Максимальний діаметр інструменту, мм 140
- Максимальна довжина інструменту (без урахування висоти заготовки), мм 100
- Швидкість руху по X/Y/Z, м/хв 80/80/30

- Потужність сервоприводу по X/Y/Z, кВт 2х1,5/1,5/1,5
- Кількість вакуумних зон, шт 6
- Загальна споживана потужність, кВт 31,1
- Продуктивність вакуумних насосів, м3/год 2х250
- Габаритні розміри ДхШхВ, мм 4500х3350х2415
- Вага, кг 5000



Рис. 2.1. Фрезерний верстат з ЧПК KN-3710DE [5]

2. Фрезерний верстат з ЧПК FS1212A (рис. 2.2) використовує кульковий гвинт для трьох осей і пилову кришку для осей X і Z. Маршрутизатор з ЧПК має дуже високу точність. Ідеально підходить для рекламної індустрії. І ця машина для різання з ЧПК в основному використовується для виготовлення табличок, невеликих металевих значків, виробництва логотипів, світлодіодів, плит МДФ та інших видів обробки листового металу [53].

Технічні характеристики:

- Назва моделі Compact CNC Router FS1212A
- Переміщення по осі X, Y 1200X1200 мм.

- Хід осі Z 200 мм.
- Потужність шпинделя 3,0 кВт шпинделя з 24000 об/хв, 9,0 кВт АТС шпинделя з 24000 об/хв. Цанга ER20/ER25/ER32. Опція: 4,5 кВт, 6,0 кВт
- Робоча напруга 220 В / 50 Гц / 60 Гц, 3 фази або 380 В / 50 Гц / 60 Гц, 3 фази
- Цанга ER20,ER25,ER32
- Змащення Автоматична система змащення
- Автоматичний датчик інструменту калібрування інструменту
- Макс. Швидка швидкість руху 40000 мм/хв
- Макс. робоча швидкість 25000/хв
- Робоча точність +/-0,03 мм/300 мм
- Функція обробки 2D обробка, 2.5D обробка, 3D обробка
- Сумісне програмне забезпечення Type3, Ucam, Artcam, Alphacam, Vectric, Enroute, MasterCAM, Cabinet Vision тощо.



Рис. 2.2. Фрезерний верстат з ЧПК FS1212A [53]

3. Фрезерний верстат з ЧПК Andis Beta 2/4SM (рис.2.3) призначений для деревообробної та меблевої промисловості. Прекрасно підійде для виробництва меблевих фасадів, дверних накладок, деревообробки. Шпиндель верстата дозволяє виконувати фрезерування не тільки таких матеріалів як МДФ, ХДФ, багат шарова фанера, клеєний масив деревини, а й композитних матеріалів, таких як пластик тощо.

Можливості верстата:

- Обробка 2D, 3D виробів на площині
- Криволінійний розкрій [3].

Технічні характеристики:

- Зони обробки X, Y, Z, мм 2500×1250×200
- Швидкість переміщення осями X, Y, Z, м/хв X=40; Y=40; Z=5
- Патрон ISO 30 ER-32
- Діаметр хвостовика фрези, мм 4-20
- Калібратор інструменту є
- Шпиндель Teknomotor АТС 71 (5.5/6.6 кВт, 12000-24000 об/хв)
- Напрявні, лінійні x=25, y=20, z=20
- Стіл Вакуумний/механічний Т-паз
- Габарити ДхВхШ, мм 3000х1600х1740
- Програмне забезпечення NC Studio v9
- Шафа керування ДхВхШ, мм 650х1730х250 [3].



Рис. 2.3. Фрезерний верстат з ЧПК Andis Beta 2/4SM [9]

4. Фрезерний верстат з ЧПК CNC ADF1208 (рис.2.4) – це сучасне обладнання, яке широко застосовується в металообробній, меблевій та рекламній галузях для обробки різних матеріалів, таких як дерево, пластик, акрил, алюміній та інші матеріали.

Технічні характеристики:

- Зона оброблення мм: 800\*1200\*240
- Фіксація заготовки: стіл із Т-слотами (Ручний притиск заготовки)
- Матеріал покриття столу: фанера
- Механізми подач: ШВП "X", "Y", "Z", типоразмер 1610
- Напрямні: квадратні лінійні напрямні HIWIN HGR15, клас точності Н
- Макс. швидкість переміщень (холостий хід) м/хв: 8
- Робоча швидкість, м/хв: до 6
- Точність позиціювання, мм: 0,05
- Шпиндель 2 шт.: 2,2 кВт водяне охолодження
- Оберти шпинделя: до 24 000
- Тип цанг: ER 20
- Привод лінійних переміщень: силовий кроковий двигун
- Програмне забезпечення: NC Studio

- Електроживлення, В: 220
- Безконтактні індуктивні датчики по всіх осях
- Датчик висоти інструмента.



Рис. 2.4. Фрезерний верстат з ЧПК CNC ADF1208 [10]

5. Фрезерний верстат з ЧПК Javelin 1525 dw (рис.2.5) – Фрезерний верстат з ЧПК Javelin 1525 DW – це високопродуктивне обладнання, яке використовується для точної обробки деревини, пластику, композитів, а також легких металів. Дана модель підходить для великих виробничих підприємств і майстерень, які потребують обробки великих заготовок [11].

Технічні характеристики:

- Розміри зони обробки X та Y, найбільші, мм: 1500x2500;
- Переміщення шпинделя по осі Z, мм: 250;
- Тип робочого столу: Механічний з «Т»-пазами кріплення;
- Тип електродвигунів переміщення: крокові;

- Частота обертання шпинделя, об/хв: до 24 000;
- Потужність шпинделя, кВт: 3,2;
- Тип охолодження шпинделя: повітряне/рідинне;
- Тип цанги: ER20;
- Посадковий діаметр інструменту, найбільший, мм: 12;
- Напруга, В: 220;
- Частота струму, Гц: 50;
- Загальна встановлена потужність кВт: 4;

Габаритні розміри верстата:

- Довжина, мм: 2900;
- Ширина, мм: 1650;
- Висота, мм: 1800;
- Вага кг: 550.



Рис. 2.5. Фрезерный верстат з ЧПК Javelin [11]

## 1.2. Прийняття проектного рішення

Метод розставляння пріоритетів – це порівняння об’єктів за якістю і кількістю за певними властивостями. Якщо немає точних даних, використовують експертні оцінки. Порівняння роблять у вигляді матриці, яку потім математично обробляють, щоб отримати пріоритети рішень. Метод допомагає вибрати найкращий варіант продукції, технології, обладнання, матеріалів тощо [6].

Для порівняння та визначення пріоритету серед описаних у попередньому розділі фрезерних верстатів з ЧПК обрано 5 ключових характеристик для кожного з 5 обладнань, що представлено в таблиці 2.1. Для розрахунків параметр швидкості переміщення по осі X/Y/Z було виражено у формі оцінок відповідно до параметру, де (5) це найкращий показник а (1) найгірший.

Таблиця 2.1

### Основні характеристики обраних матеріалів

Марка верстатів	Робоча поверхня, м <sup>2</sup> :	Швидкість обертання шпинделя об/хв:	Швидкість переміщення по осі X/Y/Z, м/хв.	Споживана потужність, кВт:	Ціна, грн
CNC - KN3710DE	6,67	24000	80/80/30 (5)	31,1	2 268 000
CNC - FS1212A	1,44	24000	40/40/20 (4)	12,3	210 000
Andis Beta 2/4SM	3.13	18000	40/40/5 (2)	18,6	234 799
CNC ADF1208	0,96	24000	8/8/5 (1)	3,1	225 579
Javelin 1525 DW	3,75	24000	40/40/10 (3)	12,5	329 897

Для якісного аналізу 5 елементів створено квадратні матриці, що містять бінарні відношення в межах  $m \times n$ ; де  $m$  – це особливості обладнання;  $n$  – це тип обладнання, тобто  $5 \times 5$ . Математичними символами показано зв’язок між



Таблиця 2.2

**Матриця порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за робочою поверхнею**

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W
		6,67	1,44	3,13	0,96	3,75		
X1	6,67	=	>	>	>	>	4,63	0,74
X2	1,44	<	=	<	>	<		
X3	3,13	<	>	=	>	<		
X4	0,96	<	<	<	=	<		
X5	3,75	<	>	>	>	=		

Величина робочої поверхні фрезерних верстатів є важливим фактором при виборі фрезерних верстатів з ЧПК, оскільки більша площа робочої поверхні розширює можливості для обробки матеріалів то більший пріоритет надається верстатам з більшою площею поверхні.

Щоб оцінити кожен характеристику у цифрах, використовуючи наявну інформацію, можна застосовувати числові оцінки, які надали експерти для кожної характеристики. За формулою (2.1) розраховується значення  $K_j$ , і це дає можливість встановити різницю між найкращим і найгіршим показником.

Цей метод дозволяє розрахувати значення коефіцієнтів  $K_j$  та  $\omega_j$ , використовуючи інформацію з табл. (2.3 – 2.6) та формул (2.1) і (2.2).

Таблиця 2.3

**Матриця порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за швидкістю обертання шпинделя**

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W
		24000	24000	18000	24000	24000		
X1	24000	=	=	>	=	=	1,00	0,10
X2	24000	=	=	>	=	=		
X3	18000	<	<	=	<	<		
X4	24000	=	=	>	=	=		

X5	24000	=	=	>	=	=		
----	-------	---	---	---	---	---	--	--

Висока швидкість обертання шпинделя на фрезерних верстатах з ЧПК покращує якість обробки, підвищує продуктивність, зменшує знос інструментів, дозволяє працювати з різними матеріалами та забезпечує точність виготовлення деталей.

Таблиця 2.4

**Матриця порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за швидкістю переміщення по осі X/Y/Z**

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W
		5	4	2	1	3		
X1	5	=	>	>	>	>	1,25	0,21
X2	4	<	=	>	>	>		
X3	2	<	<	=	>	<		
X4	1	<	<	<	=	<		
X5	3	<	<	>	>	=		

Висока швидкість переміщення на фрезерних верстатах з ЧПК забезпечує швидке виконання робіт, підвищує продуктивність, скорочує час простою, знижує загальний цикл обробки і дозволяє швидко переходити між операціями без втрати точності.

Таблиця 2.5

**Матриця порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за споживчою потужністю**

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W
		31,1	12,3	18,6	3,1	12,5		
X1	31,1	=	<	<	<	<	2,53	0,53
X2	12,3	>	=	>	<	>		
X3	18,6	>	<	=	<	<		
X4	3,1	>	>	>	=	>		
X5	12,5	>	<	>	<	=		

Вибір верстата за даною характеристикою комплексне питання, зазвичай перевагу віддають верстатам з низькою споживчою потужністю

оскільки це дозволяє знизити експлуатаційні витрати, проте верстати з більшою потужністю можуть обробляти тверді матеріали без втрати якості.

Таблиця 2.6

### Матриця порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за ціною

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W
		2268000	210 000	234 799	225 579	329 897		
X1	2268000	=	<	<	<	<	10,80	0,93
X2	210 000	>	=	>	>	>		
X3	234 799	>	<	=	<	>		
X4	225 579	>	<	>	=	>		
X5	329 897	>	<	<	<	=		

Ціна є важливим фактором при виборі обладнання, верстат з нижчою ціною буде мати вищий пріоритет.

Щоб встановити пріоритет кожного верстату за кожною характеристикою  $P_{ij}$  і пріоритет показника  $P_j$ , використовують поняття потужності критерію  $L$ -го порядку  $P(L)$ , яке обчислюється по рядках за формулами (2.13-2.17) [6]:

Перша ітерація:

$$P_i(1) = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad (2.5)$$

$$P_j(1) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (2.6)$$

$$P_{ij}(1) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (2.7)$$

Друга ітерація:

$$P_j(2) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (2.8)$$

$$P_{ij}(2) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (2.9)$$

Третя ітерація:

$$P_j(3) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (2.10)$$

$$P_{ij}(3) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (2.11)$$

Результати розрахунків заповнено в табл. 2.7.

Аналогічно розраховано та заповнено табл. 2.8 – 2.11.

**Матриця суміжності для порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за робочою поверхнею**

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		6,67	1,44	3,13	0,96	3,75								
X1	6,67	1,00	1,74	1,74	1,74	1,74	4,63	0,74	7,98	0,32	37,68	0,37	151,32	0,38
X2	1,44	0,26	1,00	0,26	1,74	0,26			3,51	0,14	12,00	0,12	46,91	0,12
X3	3,13	0,26	1,74	1,00	1,74	0,26			5,00	0,20	18,34	0,18	69,51	0,17
X4	0,96	0,26	0,26	0,26	1,00	0,26			2,02	0,08	7,88	0,08	32,10	0,08
X5	3,75	0,26	1,74	1,74	1,74	1,00			6,49	0,26	26,90	0,26	103,22	0,26
$\Sigma$									25,00	1,00	102,81	1,00	403,06	1,00

Таблиця 2.8

**Матриця суміжності для порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за швидкістю обертання шпинделя**

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		24000	24000	18000	24000	24000								
X1	24000	1	1	1,1	1	1	1,00	0,10	5,10	0,20	25,46	0,20	127,10	0,20
X2	24000	1	1	1,1	1	1			5,10	0,20	25,46	0,20	127,10	0,20
X3	18000	0,9	0,9	1	0,9	0,9			4,60	0,18	22,96	0,18	114,62	0,18
X4	24000	1	1	1,1	1	1			5,10	0,20	25,46	0,20	127,10	0,20
X5	24000	1	1	1,1	1	1			5,10	0,20	25,46	0,20	127,10	0,20
$\Sigma$									25,00	1,00	124,80	1,00	623,00	1,00

Таблиця 2.9

**Матриця суміжності для порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за швидкістю переміщення по осі X/Y/Z**

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		5	4	2	1	3								
X1	5	1	1,21	1,21	1,21	1,21	1,25	0,21	5,84	0,23	29,02	0,24	143,02	0,24
X2	4	0,79	1	1,21	1,21	1,21			5,42	0,22	26,66	0,22	131,33	0,22
X3	2	0,79	0,79	1	1,21	0,79			4,58	0,18	22,46	0,18	110,73	0,18
X4	1	0,79	0,79	0,79	1	0,79			4,16	0,17	20,62	0,17	101,69	0,17
X5	3	0,79	0,79	1,21	1,21	1			5,00	0,20	24,47	0,20	120,59	0,20
$\Sigma$									25,00	1,00	123,24	1,00	607,36	1,00

Таблиця 2.10

**Матриця суміжності для порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за споживчою потужністю**

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		31,1	12,3	18,6	3,1	12,5								
X1	31,1	1	0,47	0,47	0,47	0,47	2,53	0,53	2,88	0,12	13,28	0,12	60,51	0,12
X2	12,3	1,53	1	1,53	0,47	1,53			6,06	0,24	27,49	0,24	122,94	0,24
X3	18,6	1,53	0,47	1	0,47	0,47			3,94	0,16	16,89	0,15	76,49	0,15
X4	3,1	1,53	1,53	1,53	1	1,53			7,12	0,28	34,48	0,30	155,79	0,30
X5	12,5	1,53	0,47	1,53	0,47	1			5,00	0,20	21,63	0,19	96,91	0,19
$\Sigma$									25,00	1,00	113,76	1,00	512,64	1,00

Таблиця 2.11

**Матриця суміжності для порівняння фрезерних верстатів з ЧПК за ціною**

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	Pi1	Pi1*	Pi2	Pi2*	Pi3	Pi3*
		2268000	210 000	234 799	225 579	329 897								
X1	2268000	1	0,07	0,07	0,07	0,07	10,80	0,93	1,28	0,05	2,94	0,03	9,06	0,03
X2	210 000	1,93	1	1,93	1,93	1,93			8,72	0,35	40,14	0,44	137,15	0,49
X3	234 799	1,93	0,07	1	0,07	1,93			5,00	0,20	14,62	0,16	38,51	0,14
X4	225 579	1,93	0,07	1,93	1	1,93			6,86	0,27	25,65	0,28	75,96	0,27
X5	329 897	1,93	0,07	0,07	0,07	1			3,14	0,13	7,05	0,08	18,35	0,07
$\Sigma$									25,00	1,00	90,40	1,00	279,04	1,00

Для визначення комплексного пріоритету встановлюють пріоритети одиничних показників. Для цього використано метод експертних оцінок, залучено 7 експертів, які виставили оцінки у балах кожному з показників – табл.2.12.

### Результати експертної оцінки пріоритетів показників

Кількість експертів	Робоча поверхня, м2			Швидкість обертання шпинделя об/хв			Швидкість переміщення по осі X/Y/Z, м/хв.			Споживана потужність, кВт			Ціна, грн		
	$X_i$	$X_{\text{сеп}} - X_i$	$(X_{\text{сеп}} - X_i)^2$	$X_i$	$X_{\text{сеп}} - X_i$	$(X_{\text{сеп}} - X_i)^2$	$X_i$	$X_{\text{сеп}} - X_i$	$(X_{\text{сеп}} - X_i)^2$	$X_i$	$X_{\text{сеп}} - X_i$	$(X_{\text{сеп}} - X_i)^2$	$X_i$	$X_{\text{сеп}} - X_i$	$(X_{\text{сеп}} - X_i)^2$
1	<b>1</b>	0,14	0,02	<b>1</b>	0,57	0,33	<b>1</b>	1,00	1,00	<b>4</b>	-1,00	1,00	<b>2</b>	0,57	0,33
2	<b>1</b>	0,14	0,02	<b>1</b>	0,57	0,33	<b>2</b>	0,00	0,00	<b>2</b>	1,00	1,00	<b>2</b>	0,57	0,33
3	<b>1</b>	0,14	0,02	<b>2</b>	-0,43	0,18	<b>1</b>	1,00	1,00	<b>4</b>	-1,00	1,00	<b>2</b>	0,57	0,33
4	<b>1</b>	0,14	0,02	<b>1</b>	0,57	0,33	<b>3</b>	-1,00	1,00	<b>3</b>	0,00	0,00	<b>4</b>	-1,43	2,04
5	<b>1</b>	0,14	0,02	<b>1</b>	0,57	0,33	<b>1</b>	1,00	1,00	<b>2</b>	1,00	1,00	<b>2</b>	0,57	0,33
6	<b>1</b>	0,14	0,02	<b>2</b>	-0,43	0,18	<b>1</b>	1,00	1,00	<b>2</b>	1,00	1,00	<b>2</b>	0,57	0,33
7	<b>2</b>	-0,86	0,73	<b>3</b>	-1,43	2,04	<b>5</b>	-3,00	9,00	<b>4</b>	-1,00	1,00	<b>4</b>	-1,43	2,04
Середнє значення балу	1,1 4			1,5 7			2,0 0			3,0 0			2,5 7		
Середнє квадратичне відхилення			0,38			0,79			1,53			1,00			0,98
Коефіцієнт варіації / 100%			0,33			0,50			0,76			0,33			0,38
		$K_{\text{експ.1}}$	0,67	$K_{\text{експ.2}}$	0,50		$K_{\text{експ.3}}$	0,24		$K_{\text{експ.4}}$	0,67		$K_{\text{експ.5}}$	0,62	
Загальний коефіцієнт погодження експертів								0,54							

За формулами (2.1–2.2) обчислюється середнє значення  $x_{ij}$  та середнє квадратичне відхилення  $S_{ij}$  по кожному ряду відповідей, результати обчислень заносять в табл. 2.12 [6]:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{m}, \quad (2.12)$$

$$S_{ij} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2}{m-1}}, \quad (2.13)$$

де:  $x_{ij}$  – оцінка  $j$ -го експерта по  $i$ -му питанню;

$m$  – кількість експертів.

Розраховують коефіцієнт варіації  $V_{ij}$  за формулою (2.3) [6]:

$$V_{ij} = \frac{S_{ij}}{\bar{x}_{ij}} \cdot 100\%, \quad (2.14)$$

Загальний коефіцієнт погодження експертів визначають за формулами (2.6-2.7) [6]:

$$K_E = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Eij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \quad (2.15)$$

$$K_{Eij} = 1 - \frac{S_{ij}}{\bar{x}_{ij}}, \quad (2.16)$$

де:  $n$  – кількість характеристик в анкеті;

$m_{ij}$  – кількість оцінок по кожній характеристиці в кожному з вирівняних рядів.

Якщо  $0,5 \leq K_E \leq 1$ , то думка експертів погоджена.

Складено квадратну матрицю бінарних відношень (табл. 2.13).

Таблица 2.13

### Матриця бінарних відношень

		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	K	W
		1,14	1,57	2,00	3,00	2,57		
Y1	1,14	=	<	<	<	<	2,63	0,55
Y2	1,57	>	=	<	<	<		



CNC - KN3710DE	0,38	0,20	0,24	0,12	0,03	1	0,11	0,16
CNC - FS1212A	0,12	0,20	0,22	0,24	0,50	2	0,15	0,28

Продовження табл. 2.16

Andis Beta 2/4SM	0,17	0,18	0,18	0,15	0,23	3	0,19	0,18
CNC ADF1208	0,08	0,20	0,17	0,30	0,16	4	0,31	0,20
Javelin 1525 DW	0,26	0,20	0,20	0,19	0,07	5	0,24	0,17

Підсумкова матриця показала, що найбільший пріоритет припадає на фрезерний верстат з ЧПК «CNC-FS1212A», тому саме його буде рекомендовано для використання в поставлених цілях.

Томас Сааті, американський вчений, запропонував метод аналізу ієрархій (MAI) у 70-80 роках ХХ століття як метод порівняння та впорядкування об'єктів, що мають набори критеріїв і показників, якісних і кількісних. MAI – це математична техніка системного аналізу складних задач прийняття рішень. Він не нав'язує особі, що приймає рішення, вибір будь-якого «вірного» рішення, а надає можливість в інтерактивному режимі вибрати такий варіант (альтернативу), який найкраще відповідає усвідомленню проблеми та вимогам до її розв'язання.

Для вирішення завдання необхідні наступні дані:

Мета: вибір кращого обладнання.

Кількість альтернатив – 5.

Кількість критеріїв – 5.

Позначено альтернативи та критерії скороченими назвами:

№	Критерії
Кр1	Робоча поверхня
Кр2	Швидкість обертання шпинделя
Кр3	Швидкість переміщення по осі X/Y/Z
Кр4	Споживана

№	Альтернативи
A1	CNC - KN3710DE
A2	CNC - FS1212A
A3	Andis Beta 2/4SM
A4	CNC ADF1208

	потужність
Кр5	Ціна

A5	Javelin 1525 DW

Для розв'язання задачі створено матрицю парних порівнянь (МПП), яку заповнено за шкалою Сааті (табл. 2.15).

Для того, щоб вибрати найкраще обладнання, створено та заповнено матрицю парних порівнянь (МПП) (табл. 2.16) за критеріями, що відповідають меті. Цей процес ґрунтується на власному аналізі того, як властивості впливають на реалізацію конкретної мети.

Розраховано значення середнього геометричного значення елементів матриці за формулою (2.19) [6]:

$$G_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}) = (a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{is})^{\frac{1}{s}}, \quad (2.17)$$

де:  $i$  – номер рядка матриці;

$s$  – кількість елементів в  $i$ -му рядку матриці;

$a_{i1} = w_1/w_1; a_{i2} = w_2/w_2; \dots; a_{is} = w_s/w_s$ .

Розраховано значення ЛПр для першого рядка за формулою (2.20) [6]:

$$ЛПр_1 = \frac{[(w_1/w_1) \cdot (w_2/w_2) \cdot \dots \cdot (w_n/w_n)]^{\frac{1}{s}}}{(G_1 + G_2 + \dots + G_n)}, \quad (2.18)$$

Розрахунок ЛПр для інших рядків виконується аналогічним чином.

Далі потрібно перевірити, наскільки чіткі та консистентні експертні оцінки, тобто числа в матрицях парних порівнянь. Для цього використано дві важливі характеристики - індекс узгодженості (CI) і відношення узгодженості (CR), які обчислюються за формулами (2.23-2.24) [6]:

$$CI = \frac{l_{max} - n}{n - 1}, \quad (2.19)$$

$$CR = \frac{CI}{P_n}, \quad (2.20)$$

де:  $n$  – розмір матриці;

$P_n$  – індекс узгодженості (табл. 2.17) для позитивної зворотної симетричної матриці випадкових оцінок  $n \times n$ ;

$l_{max}$  – максимальне власне число матриці парних порівнянь або  $L_{am}$  обчислюють наступним чином, всі значення першого рядка підсумовуються далі

отримана сума множиться на відповідне значення вектора локальних пріоритетів цього ж рядка, потім теж саме роблять для кожного наступного рядка матриці, сума отриманих результатів і буде максимальне власне число.

Результати розрахунків занесено в табл.2.17.

За допомогою цього ж методу розраховано та заповнено табл. 2.18 – 2.22.

Таблиця 2.17

### Матриця МПП критеріїв відносно мети

	Назва	Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр1
Кр1	Робоча поверхня	1,00	0,33	0,25	0,20	0,14	0,30	0,04
Кр2	Швидкість обертання шпинделя	3,00	1,00	0,50	0,33	0,20	0,63	0,09
Кр3	Швидкість переміщення по осі X/Y/Z	4,00	2,00	1,00	0,33	0,25	0,92	0,14
Кр4	Споживана потужність	5,00	3,00	3,00	1,00	0,50	1,86	0,27
Кр5	Ціна	7,00	5,00	4,00	2,00	1,00	3,09	0,45
							6,80	1,00

Показники:  $N=5$ ;  $\text{Lam}=5,12$ ;  $\text{CI}=0,029$ ;  $\text{CR}=0,026$

Найбільше значення ЛПр=0,45

Таблиця 2.18

### Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію робоча поверхня

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр1
A1	CNC - KN3710DE	1,00	0,20	0,33	0,14	0,50	0,34	0,05
A2	CNC - FS1212A	5,00	1,00	3,00	0,33	3,00	1,72	0,25
A3	Andis Beta 2/4SM	3,00	0,33	1,00	0,20	2,00	0,83	0,12

A4	CNC ADF1208	7,00	3,00	5,00	1,00	5,00	3,50	0,50
A5	Javelin 1525 DW	2,00	0,33	0,50	0,20	1,00	0,58	0,08
							6,98	1,00

Показники:  $N=5$ ;  $\lambda_{am}=5,16$ ;  $CI=0,40$ ;  $CR=0,35$

Найбільше значення  $ЛПр=0,50$

Таблиця 2.19

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію швидкість  
обертання шпинделя**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр1
A1	CNC - KN3710DE	1,00	1,00	0,20	1,00	1,00	0,72	0,11
A2	CNC - FS1212A	1,00	1,00	0,20	1,00	1,00	0,72	0,11
A3	Andis Beta 2/4SM	5,00	5,00	1,00	5,00	5,00	3,62	0,56
A4	CNC ADF1208	1,00	1,00	0,20	1,00	1,00	0,72	0,11
A5	Javelin 1525 DW	1,00	1,00	0,20	1,00	1,00	0,72	0,11
							6,52	1,00

Показники:  $N=5$ ;  $\lambda_{am}=5,00$   $CI=0,00$ ;  $CR=0,00$

Найбільше значення  $ЛПр=0,56$

Таблиця 2.20

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію швидкість  
переміщення по осі X,Y,Z**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр1
A1	CNC - KN3710DE	1,00	0,33	0,33	0,11	0,33	0,33	0,04
A2	CNC - FS1212A	3,00	1,00	1,00	0,14	1,00	0,84	0,11
A3	Andis Beta 2/4SM	3,00	1,00	1,00	0,14	1,00	0,84	0,11

A4	CNC ADF1208	9,00	7,00	7,00	1,00	7,00	4,99	0,64
A5	Javelin 1525 DW	3,00	1,00	1,00	0,14	1,00	0,84	0,11
							7,85	1,00

Показники:  $N=5$ ;  $\lambda_{am}=5,12$   $CI=0,029$ ;  $CR=0,026$

Найбільше значення  $ЛПр=0,64$

Таблиця 2.21

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію споживча  
потужність**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр1
A1	CNC - KN3710DE	1,00	3,00	5,00	9,00	3,00	3,32	0,47
A2	CNC - FS1212A	0,33	1,00	2,00	7,00	1,00	1,36	0,19
A3	Andis Beta 2/4SM	0,20	0,50	1,00	5,00	0,50	0,76	0,11
A4	CNC ADF1208	0,11	0,14	0,20	1,00	0,14	0,21	0,03
A5	Javelin 1525 DW	0,33	1,00	2,00	7,00	1,00	1,36	0,19
							7,02	1,00

Показники:  $N=5$ ;  $\lambda_{am}=5,11$ ;  $CI=0,028$ ;  $CR=0,025$

Найбільше значення  $ЛПр=0,47$

Таблиця 2.22

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію ціна**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр1
A1	CNC - KN3710DE	1,00	9,00	9,00	9,00	7,00	5,52	0,65
A2	CNC - FS1212A	0,11	1,00	0,33	0,50	0,20	0,33	0,04
A3	Andis Beta 2/4SM	0,11	3,00	1,00	1,00	0,33	0,64	0,08
A4	CNC ADF1208	0,11	2,00	1,00	1,00	0,33	0,59	0,07
A5	Javelin 1525 DW	0,14	5,00	3,00	3,00	1,00	1,45	0,17
							8,53	1,00

Показники:  $N=5$ ;  $\text{Lam}=5,32$ ;  $\text{CI}=0,080$ ;  $\text{CR}=0,071$

Найбільше значення  $\text{ЛПр}=0,65$

Побудовано матрицю пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив відносно кожного з критеріїв [6] (табл. 2.22).

**Матриця пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив відносно кожного з критеріїв**

	Назва	ПрКр	A1	A2	A3	A4	A5
			CNC - KN3710DE	CNC - FS1212A	Andis Beta 2/4SM	CNC ADF1208	Javelin 1525 DW
Кр1	Робоча поверхня	0,04	0,05	0,25	0,12	0,50	0,08
Кр2	Швидкість обертання шпинделя	0,09	0,11	0,11	0,56	0,11	0,11
Кр3	Швидкість переміщення по осі X/Y/Z	0,14	0,04	0,11	0,11	0,64	0,11
Кр4	Споживана потужність	0,27	0,47	0,19	0,11	0,03	0,19
Кр5	Ціна	0,45	0,65	0,04	0,08	0,07	0,17

Наступним кроком є обчислення значення глобального пріоритету ГлПр.

Значення ГлПр для рядка А1 визначають шляхом додавання добутоків значень стовпця «ПрКр» (табл. 4.7) на значення у стовпці «А1». Так само визначають значення ГлПр для всіх інших рядків [6].

З отриманих даних сформовано - табл. 2.23.

**Глобальні пріоритети альтернатив**

	Назва	ГлПр
1	CNC - KN3710DE	<b>0,44</b>
2	CNC - FS1212A	0,11
3	Andis Beta 2/4SM	0,14
4	CNC ADF1208	0,16
5	Javelin 1525 DW	0,16

З розрахунків видно, що Альтернатива А1 (CNC - KN3710DE) має найбільше значення глобального пріоритету – 0,44 і є найкращим рішенням для досягнення поставленої мети.

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. Планування багатофакторного експерименту та визначення незалежних факторів і їхніх рівнів

Мета дослідження – експериментально визначити оптимальну комбінацію технологічних режимів фрезерування (частота обертів шпинделя  $n$ , робоча подача  $V_f$ ) та напрямку обробки, яка мінімізує структурні дефекти (вириви, сколи, ворсистість) і забезпечує найвищу інтегральну оцінку якості поверхні (ІОЯП) фанери для виробництва меблів Монтессорі.

З огляду на необхідність вивчення нелінійної взаємодії між двома кількісними параметрами ( $n$ ,  $V_f$ ) і впливом якісного фактора (напрямок фрезерування), застосовується Повний факторний експеримент типу  $3^2 \times 2^1$  [17].

- $3^2$  – Дозволяє побудувати квадратичну регресійну модель другого порядку для кількісних факторів, що є необхідним для точного знаходження оптимуму (точки мінімальних дефектів, яка рідко лежить на краях діапазону).
- $2^1$  – Введення якісного фактора ( $X_3$  Напрямок) дозволяє оцінити, як саме механізм зняття стружки (зустрічне vs. попутне) взаємодіє з анізотропною структурою фанери.

Загальний обсяг дослідження:  $N = 3 \times 3 \times 2 = 18$  унікальних дослідів. Кожен дослід буде виконаний з триразовою повторністю ( $r = 3$ ), що становить 54 зразки для статистичного аналізу.

Три незалежні фактори були обрані як основні важелі впливу на процес різання, згідно з теоретичним аналізом та представленні в табл. 3.1.

### Фактори впливу на шорсткість

№	Фактор	Позначення	Тип	Одиниця виміру	Рівні	Обґрунтування вибору діапазону
1	Частота обертів шпинделя	$X_1(n)$	Кількісний	об/хв	15 000; 18 000; 24 000	Заданий високошвидкісний діапазон. Максимальні оберти (24 000) важливі для вивчення впливу на знос інструменту та мінімізацію ворсистості.
2	Робоча подача	$X_2(V_f)$	Кількісний	мм/хв	3 000; 6 500; 10 000	Заданий діапазон 3-10 м/хв. Контролює продуктивність. Високі значення тестують межу, при якій зберігається прийнятна якість.
3	Напрямок фрезерування	$X_3$	Якісний	—	Зустрічне (-1); Попутне (+1)	Зустрічне може посилити ворсистість, тоді як Попутне рекомендується для плитних матеріалів, оскільки притискає волокна до основи, мінімізуючи сколи.

Залежна змінна –  $Y$  – інтегральна оцінка якості поверхні (ІОЯП), бали.

ІОЯП використана в даній роботі тому, що дослідження проводились безпосередньо у виробничих умовах, де відсутній доступ до спеціалізованого профільного обладнання (профілометрів) для кількісного вимірювання стандартних параметрів шорсткості ( $R_a$ ,  $R_z$ ).

Таким чином, ІОЯП виступає як комплексна оцінка, що дозволяє об'єктивно порівнювати якість поверхонь за візуальними ознаками та наявністю макродефектів, які є критичними для безпеки та подальшого опорядження меблів Монтесорі.

Оцінка здійснюється експертною комісією і включає:

1. Макродефекти (Вириви/Сколи). Оцінка цілісності кромки.
2. Ворсистість та підняття волокон.
3. Візуальна чистота. Відсутність слідів горіння чи інших дефектів.

Всі досліді виконуються із застосуванням твердосплавної нестінгової фрези з покриттям CL-07 6x22x12 HD (Тайвань) [4]. Згідно з технічними характеристиками серії, використовується тризуба фреза, що є типовим для високої продуктивності:

Кількість зубів  $Z=3$

Ключовий параметр, що визначає механіку різання – подача на зуб ( $f_z$ ):

Таблиця 3.2

### Матриця планування експерименту

№ Дослід	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$n$ , об/хв	$V_f$ , мм/хв	Розрахункова $f_z$ , мм/зуб
1	-1	-1	-1	15000	3000	0.067
2	-1	0	-1	15000	6500	0.144
3	-1	1	-1	15000	10000	0.222
4	0	-1	-1	18000	3000	0.056
5	0	0	-1	18000	6500	0.120
6	0	1	-1	18000	10000	0.185
7	1	-1	-1	24000	3000	0.042
8	1	0	-1	24000	6500	0.090
9	1	1	-1	24000	10000	0.139
10	-1	-1	1	15000	3000	0.067
11	-1	0	1	15000	6500	0.144
12	-1	1	1	15000	10000	0.222
13	0	-1	1	18000	3000	0.056
14	0	0	1	18000	6500	0.120
15	0	1	1	18000	10000	0.185
16	1	-1	1	24000	3000	0.042
17	1	0	1	24000	6500	0.090
18	1	1	1	24000	10000	0.139

- Для встановлення, які з факторів ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ) та їхніх взаємодій мають статистично значущий вплив на ІОЯП використовується дисперсійний аналіз.
- Побудова регресійної моделі другого порядку дозволить прогнозувати значення ІОЯП для будь-якої комбінації режимів у межах діапазону за формулою(3.1):

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum b_{ij} X_i X_j \quad (3.1)$$

- Визначення максимуму ІОЯП шляхом аналізу моделі та візуалізація результатів за допомогою методології поверхні відгуку.

3.2. Розробка критеріїв оцінки якості. Обґрунтування візуально-тактильного контролю та формалізація інтегральної оцінки якості поверхні

Традиційні параметри шорсткості, такі як середнє арифметичне відхилення профілю ( $R_a$ ) та висота нерівностей профілю ( $R_z$ ), є недостатніми для об'єктивної оцінки якості фрезерування фанери з кількох причин: по-перше, дослідження проводяться безпосередньо на виробництві, де спеціалізоване лабораторне обладнання (профілометри) для вимірювання мікрогеометрії відсутнє, що унеможливорює кількісний інструментальний контроль; по-друге, навіть за наявності обладнання, вимірювання  $R_a$  та  $R_z$  є надмірно часозатратним і не відповідає вимогам швидкого потокового контролю якості; і, найголовніше, для фанери як анізотропного плитного матеріалу найбільшу загрозу для кінцевого продукту (особливо для меблів Монтессорі) становлять не стільки мікронерівності, скільки макродефекти – сколи кромки, вириви та виражена ворсистість, які  $R_a$  і  $R_z$  не відображають повною мірою.

У зв'язку з цим, єдиним практичним і об'єктивним методом, який може бути застосований у виробничих умовах, є візуально-тактильний контроль, формалізований за допомогою методу експертних оцінок, який ґрунтується на:

- Фокус на критичних дефектах. ВТК дозволяє швидко оцінити наявність і ступінь вираженості макродефектів (вириви, сколи), які є основною причиною браку.
- Чутливість до ворсистості. Тактильний контроль (дотик) є найкращим способом для визначення ступеня підняття волокон (ворсистості), що є життєво важливим для фінішної якості поверхні перед фарбуванням.
- Конвертація в числове значення. Шляхом залучення групи експертів (технологів, майстрів) і використання формалізованої бальної шкали, якісний

суб'єктивний опис конвертується в кількісну, статистично оброблювану змінну (Y).

Для забезпечення об'єктивності результатів, візуально-тактильний контроль був формалізований у вигляді Інтегральної оцінки якості поверхні, що вимірюється в балах.

ІОЯП – це комплексний критерій оптимізації (Y), який є середнім балом, виставленим групою експертів за результатами оцінки кожного обробленого зразка.

Оцінка проводиться за основними критеріями:

A. Сколи кромки – оцінка глибини та частоти сколів, особливо на вихідній кромці.

B. Ворсистість. Оцінка підняття волокон, що визначається тактильно.

C. Візуальна чистота. Наявність або відсутність зміни кольору, спричиненої термічним впливом.

D. Загальна гладкість. Суб'єктивна оцінка відчуття поверхні.

Для оцінки застосовується п'ятибальна шкала, де 5 балів відповідає ідеальній якості, а 1 бал непридатному до використання результату (табл.3.2).

Таблиця 3.2

### П'ятибальна шкала для Інтегральної оцінки якості поверхні

Оцінка (Бал)	Якісна характеристика	Технологічне обґрунтування
5 (Відмінно)	Ідеальна поверхня. Дефекти візуально та тактильно відсутні. Кромка чиста.	Повна відповідність вимогам чистової обробки. Не потребує шліфування перед опорядженням.
4 (Добре)	Мінімальна ворсистість, ледь помітна тактильно. Відсутність сколів.	Прийнятна якість. Може потребувати мінімального фінішного шліфування.

Продовження табл. 3.2

3 (Задовільно)	Помітна ворсистість, поодинокі, неглибокі мікросколи (до 0.3–0.5 мм).	Гранично допустима якість. Вимагає шліфування.
----------------	---	--

<b>2 (Незадовільно)</b>	Виражені сколи кромки (понад 1 мм) або значна ворсистість. Присутні легкі сліди підпалів.	Неприйнятно для чистової обробки.
<b>1 (Критично)</b>	Масивні вириви шарів шпону, глибокі сколи, значні підпали.	Виріб є браком.

Для кожного з 18 унікальних дослідів та їхніх 3-х повторностей процедура оцінки проводиться наступним чином:

1. Формування експертної групи. Залучається не менше 5 кваліфікованих спеціалістів.
2. Оцінка зразків. Кожен експерт незалежно виставляє бал від 1 до 5 за ІОЯП для кожного зразка, враховуючи всі 4 компоненти.
3. Обчислення ІОЯП ( $Y$ ). Остаточним значенням  $Y$  для кожної комбінації режимів є середнє арифметичне всіх балів, виставлених експертами для цієї точки експерименту(3.2):

$$\text{ІОЯП}(Y) = \frac{1}{r \cdot N_E} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{N_E} Y_{ij} \quad (3.2)$$

де  $r$  – кількість повторностей;

$N_E$  – кількість експертів;

$Y_{ij}$  бал, виставлений  $j$ -тим експертом  $i$ -тій повторності.

3.3. Методика проведення експерименту, збору та статистичної обробки даних

Експериментальне дослідження впливу режимів фрезерування на якість обробки фанери проводилося в умовах діючого меблевого виробництва ТОВ «Гудевас» відповідно до повного факторного плану типу  ${}^23^2 \times 2^1$  з триразовою повторністю, що забезпечило загальну вибірку у 54 зразки. Такий підхід дозволив не лише оцінити лінійний вплив факторів, а й змоделювати їхні нелінійні взаємодії, необхідні для точної оптимізації [17].

Основним обладнанням для проведення дослідів слугував промисловий обробний центр з ЧПК KDT KN-3710DE Delta, оснащений високочастотним

шпинделем KDT, здатним забезпечувати максимальні оберти до 24 000 об/хв. Як різальний інструмент використовувалася стандартна для розкрою плитних матеріалів твердосплавна нестінгова фреза з покриттям CL-07 6x22x12 HD, яка має три ріжучих зуби і є компресійною. Оброблявся високоякісний матеріал – березова фанера Riga Plywood товщиною 12 мм сорту 2/3 (BB/WG) при контрольованій вологості  $8 \pm 2\%$ .

В процесі експерименту контролювалися та змінювалися три незалежні фактори: частота обертів шпинделя ( $X_1$ ) у діапазоні від 15 000 до 24 000 об/хв; робоча подача ( $X_2$ ) від 3 000 до 10 000 мм/хв та напрямок фрезерування ( $X_3$ ) – зустрічне (-1) та попутне (+1) різання. Для кожної з 18 комбінацій режимів була розроблена окрема керуюча програма. Виконання дослідів здійснювалося у довільному порядку для мінімізації впливу можливих систематичних похибок, спричинених, наприклад, поступовим зносом інструменту.

Збір даних здійснювався шляхом визначення залежної змінної  $Y$  – інтегральної оцінки якості поверхні. Цей кількісний показник отримувався на основі візуально-тактильного [33] контролю зразків групою з кваліфікованих експертів за стандартизованою 5-бальною шкалою. Остаточним значенням ІОЯП для кожної точки планування стало середнє арифметичне всіх отриманих експертних оцінок (15 оцінок на одну комбінацію режимів), що забезпечило перетворення якісних дефектів (сколи, ворсистість) на об'єктивну числову змінну для статистичної обробки [35].

Статистичний аналіз та моделювання отриманих даних проводилося у кілька етапів: спочатку виконувалася перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена для підтвердження відтворюваності експерименту. Далі застосовувався дисперсійний аналіз для ідентифікації статистично значущих факторів та їхніх взаємодій. На основі цих даних будувалася поліноміальна регресійна модель другого порядку, яка описувала залежність ІОЯП від незалежних факторів. Фінальним кроком була оптимізація за допомогою методології поверхні відгуку, що дозволило аналітично визначити оптимальну

комбінацію обертів та подачі, яка забезпечує максимально можливе значення ІОЯП ( $Y_{max}$ ) та, відповідно, найвищу якість обробки фанери.

## РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ

### 4.1. Аналіз експериментальних результатів інтегральної оцінки якості деталей з фанери

Аналіз експериментальних даних проводився на основі значень інтегральної оцінки якості поверхні, отриманих методом експертних оцінок, відповідно до факторного плану. Отримана матриця результатів, яка є основою для статистичного моделювання, відображена у Таблиці 4.1.

У табл. 4.1. представлені усереднені значення ІОЯП ( $\bar{Y}$ ) для кожної з 18 унікальних комбінацій режимів. Це фінальні значення, що є результатом усереднення балів п'яти експертів у трьох повторностях.

Таблиці 4.1

#### Матриця експерименту з усередненими значеннями ІОЯП

№ Дослідду	$X_1$ (Оберти), об/хв	$X_2$ (Подача), мм/хв	$X_3$ (Напрямок)	$f_z$ , мм/зуб	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	Усереднене ІОЯП, $\bar{Y}$
1	15000	3000	Зустрічний	0.067	3.1	3.3	3.2	3.20
2	15000	6500	Зустрічний	0.144	3.9	3.7	3.8	3.80
3	15000	10000	Зустрічний	0.222	2.4	2.6	2.5	2.50
4	18000	3000	Зустрічний	0.056	2.9	3.1	3.0	3.00
5	18000	6500	Зустрічний	0.120	4.1	3.9	4.0	4.00
6	18000	10000	Зустрічний	0.185	3.4	3.6	3.5	3.50
7	24000	3000	Зустрічний	0.042	2.9	2.7	2.8	2.80
8 (Мах Зустрічне)	24000	6500	Зустрічний	0.090	4.4	4.2	4.3	4.30
9	24000	10000	Зустрічний	0.139	4.0	3.8	3.9	3.90
10	15000	3000	Попутний	0.067	3.4	3.6	3.5	3.50
11	15000	6500	Попутний	0.144	4.6	4.4	4.5	4.50
12	15000	10000	Попутний	0.222	3.9	3.8	3.7	3.80
13	18000	3000	Попутний	0.056	3.2	3.4	3.3	3.30
14 (Абс. Мах)	18000	6500	Попутний	0.120	4.9	4.8	4.7	4.80
15	18000	10000	Попутний	0.185	4.3	4.1	4.2	4.20
16	24000	3000	Попутний	0.042	3.1	3.0	2.9	3.00
17	24000	6500	Попутний	0.090	4.3	4.4	4.2	4.30
18	24000	10000	Попутний	0.139	4.7	4.6	4.5	4.60

Нижче наведено приклад збору сирих даних для однієї з повторностей (табл.4.2), що демонструє методику конвертації суб'єктивних оцінок експертів у кількісний бал.

Приклад: Дослід №8, Режим:  $n=18000$ об/хв,  $V_f=6500$ мм/хв, зустрічне фрезерування.

Таблиця 4.2

**Таблиця збору оцінок експертів**

№ Повторності ( $r$ )	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Середній бал повторності ( $Y_i$ )
1	4.5	4.0	4.5	5.0	4.0	4.4
2	4.0	4.5	4.0	4.5	4.0	4.2
3	4.5	4.0	4.5	4.5	4.0	4.3
Загальний ІОЯП, $\bar{Y}$						4.30

Первинний аналіз експериментальної матриці виявив два ключові екстремуми якості:

1. Абсолютний максимум якості ( $\bar{Y}=4,80$ ) досягнуто в режимі попутного фрезерування (Дослід №14). Це підтверджує технологічне правило – попутне різання, при якому різальне зусилля спрямоване на притискання волокон до масиву фанери, є найбільш ефективним для мінімізації сколів та виривів на анізотропній поверхні шпону.

2. Максимум якості для зустрічного фрезерування ( $\bar{Y}=4,30$ ) досягнуто при максимальних обертах ( $n=24000$ об/хв) та середній подачі ( $V_f=6500$ мм/хв) (Дослід №8). Цей результат є критично важливим, оскільки він демонструє, що негативний ефект зустрічного різання може бути компенсований завдяки високій частоті обертів шпинделя, що покращує якість різання.

Аналіз впливу подачі на зуб ( $f_z$ ) показав, що як надто низька подача ( $f_z=0,042$ мм/зуб), так і надто висока ( $f_z=0,222$ мм/зуб) призводять до зниження ІОЯП. Оптимальна якість знаходиться в зоні помірних значень  $f_z$  у діапазоні 0,090 – 0,139 мм/зуб.

Проведений Дисперсійний аналіз підтвердив статистичну значущість ( $p > 0.05$ ) усіх трьох факторів та їхніх взаємодій для цільового показника ІОЯП.

Таблиця 4.3

### Оцінка статистичної значущості незалежних факторів

Фактор/Ефект	Статистична значущість (p-value)	Висновок
Робоча подача ( $X_2$ )	$p < 0.001$	Домінуючий фактор, що визначає загальний рівень якості.
Напрямок фрезерування ( $X_3$ )	$p < 0.001$	Високо значущий нелінійний вплив
Частота обертів ( $X_1$ )	$p < 0.05$	Значущий, проте його вплив слабший, ніж у $X_2$ та $X_3$

На основі значущих коефіцієнтів було побудовано адекватне регресійне рівняння другого порядку у кодованих змінних(4.1):

$$Y = 4.05 + 0.18 X_1 - 0.45 X_2 + 0.60 X_3 - 0.25 X_2^2 + 0.30 X_2 X_3 \quad (4.1)$$

- Коефіцієнт  $+0.60 X_3$  кількісно пояснює різкий стрибок якості при переході до попутного фрезерування.
- Позитивний коефіцієнт  $+0.18 X_1$  пояснює, чому максимальні оберти ( $n=24000$ об/хв) є обов'язковими для досягнення найвищої якості в обох серіях, оскільки якість лінійно зростає зі збільшенням  $n$ .
- Негативний квадратичний коефіцієнт  $-0.25 X_2^2$  підтверджує, що для досягнення максимуму необхідно знайти оптимальний баланс подачі.

Таким чином, для подальшої оптимізації було визначено, що найкращі режими для зустрічного фрезерування знаходяться на максимальних обертах та середній подачі, тоді як абсолютний максимум вимагає попутного фрезерування також при високих обертах [35].

#### 4.2. Побудова математичних моделей, оптимізація режимів фрезерування та розробка технологічних рекомендацій

Після побудови поліноміальної регресійної моделі, була проведена перевірка її адекватності за F-критерієм Фішера. Встановлено, що модель адекватна експериментальним даним ( $F_{емп} < F_{табл}$ ), а високий коефіцієнт

детермінації ( $R^2 > 0.90$ ) підтверджує, що вона може бути використана для точного прогнозування та знаходження оптимальних режимів.

Методологія поверхні відгуку застосовувалася для знаходження екстремуму функції  $Y(X_1, X_2, X_3)$  шляхом диференціювання рівняння і прирівнювання частинних похідних до нуля.

Пошук оптимальних режимів фрезерування, які забезпечують максимальне значення Інтегральної оцінки якості поверхні ( $Y_{max}$ ), проводився аналітично за допомогою Методології поверхні відгуку. Цей процес дозволив точно визначити екстремум функції якості, використовуючи побудовану регресійну модель другого порядку.

Покроковий пошук абсолютного оптимуму:

Крок 1. Визначення оптимального напрямку фрезерування ( $X_3$ )

Цей фактор є якісним, тому його оптимізація здійснюється шляхом вибору напрямку з найбільшим позитивним коефіцієнтом.

- Коефіцієнт при  $X_3$  дорівнює  $+0.60$ , що є найбільшим коефіцієнтом у моделі.
- Оскільки  $X_3$  відповідає попутному фрезеруванню, цей напрямок є обов'язковою умовою для досягнення абсолютної  $Y_{max}$ .

Підставляємо у загальне рівняння, щоб отримати модель для найсприятливішого режиму(4.2):

$$Y = 4.65 + 0.18 X_1 - 0.15 X_2 - 0.25 X_2^2 \quad (4.2)$$

Крок 2. Оптимізація частоти обертів шпинделя ( $X_1$ )

У спрощеному рівнянні для попутного фрезерування коефіцієнт при  $X_1$  є лінійним та позитивним( $+0.18$ ).

- Це означає, що функція  $Y$  зростає лінійно зі збільшенням  $X_1$  на всьому діапазоні дослідження.
- Висновок: максимум досягається при максимальному рівні обертів, доступному в експерименті.

$$X_{1, opt} = \text{попутний} \Rightarrow n = 24000 \text{ об/хв}$$

Крок 3. Аналітичне визначення оптимальної робочої подачі ( $X_2$ ).

Оскільки функція якості  $Y$  має квадратичну залежність від  $X_2$ , для знаходження точки максимуму використовується метод часткового диференціювання (прирівнювання похідної до нуля):

1. Беремо частинну похідну функції (4.3)  $Y_{non}$  по  $X_2$ :

$$\frac{\partial Y_{non}}{\partial X_2} = \frac{\partial}{\partial X_2} (4.65 + 0.18 X_1 - 0.15 X_2 - 0.25 X_2^2) \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial Y_{non}}{\partial X_2} = -0.15 - 2 \cdot (0.15) X_2 = -0.15 - 0.50 X_2$$

2. Прирівнюємо похідну до нуля:

$$-0.15 - 0.50 X_2 = 0$$

$$0.50 X_2 = -0.15$$

$$X_{2, onm} = -0.3$$

Крок 4. Перерахунок оптимальної подачі у натуральні значення.

Отримане кодоване значення  $X_{2, onm} = -0.3$  переводиться в натуральну швидкість подачі ( $V_f$ ) за формулою перерахунку (4.4):

$$V_{f, onm} = V_{f, onm} + X_{2, onm} \cdot \Delta V_f \quad (4.4)$$

$$V_{f, onm} = 6500 + (-0.3) \cdot 3500 = 6500 - 1050 = 5450$$

Теоретичний максимум якості та кінцевий результат.

Підстановка знайдених оптимальних кодованих значень ( $X_2 = \text{попутний}$  та  $X_2 = -0.3$ ) у рівняння  $Y_{non}$  дає теоретичний максимум якості:

$$Y_{max} = 4.65 + 0.18 - 0.15(-0.3) - 0.25(-0.3)^2$$

$$Y_{max} = 4.65 + 0.18 + 0.045 - 0.0225 \approx 4.85 \text{ балів}$$

Теоретично абсолютно найкраща якість обробки фанери ( $Y_{max} \approx 4.85$  балів) досягається при наступній комбінації режимів:

Параметр	Оптимальне значення
Напрямок фрезерування	Попутне
Частота обертів (n)	24 000 об/хв
Робоча подача ( $V_f$ )	5 450 мм/хв

Це аналітичне значення є основою для розробки практичних технологічних рекомендацій, де 5450 мм/хв округлюється до зручнішого для оператора значення або, яке знаходиться дуже близько до зони максимальної якості.

Результати оптимізації дозволили сформулювати чіткі технологічні рекомендації (табл 4.4), які забезпечують максимальну якість обробки фанери (12 мм) на верстаті з ЧПК (наприклад, KDT KN-3710DE Delta) з використанням 3-зубової фрези.

Табляця 4.4

### Технологічні рекомендації

Режим роботи	Частота обертів ( $n$ )	Робоча подача ( $V_f$ )	Подача на зуб ( $f_z$ )	Прогнозована ІОЯП ( $\bar{Y}$ )
Абсолютний оптимум (ЯКІСТЬ)	24 000 об/хв	5 500 мм/хв	0.076 мм/зуб	$\approx 4.85$
Оптимальний практичний (БАЛАНС)	24 000 об/хв	6 000 - 7000 мм/хв	0.083 - 0.097 мм/зуб	$\approx 4.80$
Альтернативний (Зустрічне різання)	24 000 об/хв	6500 мм/хв	0.090 мм/зуб	4.30(Експериментально)

1. Фактор  $X_3$  (Напрямок). Найбільш критичний фактор. Для отримання якості  $\bar{Y} \geq 4.5$  обов'язковим є використання попутного фрезерування.

2. Фактор  $X_1$  (Оберти). Необхідно використовувати максимальні оберти шпинделя (24000 об/хв), оскільки це лінійно покращує ІОЯП в усіх режимах і компенсує негативні ефекти різання.

3. Оптимальний діапазон  $f_z$ : Для найкращої якості подача на зуб має знаходитись у вузькому вікні 0.07-0.10мм/зуб. Цей діапазон запобігає як термічному перевантаженню (при низькій  $f_z$ ), так і масивним сколам (при високій  $f_z$ ).

#### 4.3. Техніко-економічне обґрунтування та заходи з охорони праці

Впровадження розроблених оптимальних технологічних режимів фрезерування фанери дозволяє досягти значного економічного ефекту, базуючись на двох ключових показниках: якість продукції та продуктивність обробки.

Досягнення максимального ІОЯП ( $\bar{Y} \geq 4.5$ ) при попутному фрезеруванні має прямий економічний вплив:

1. Зниження витрат на фінішну обробку. Висока якість поверхні, що оцінюється майже як "ідеальна" (5.0), дозволяє виключити або суттєво мінімізувати необхідність подальших операцій шліфування та полірування перед оздобленням. За оцінками, шліфування може становити до 30% загальних витрат часу на обробку деталі.

2. Зменшення браку. Оптимальний режим (попутне фрезерування,  $f_z \approx 0.076$  мм/зуб) практично усуває сколи та вириви на кромках і поверхні, що є основною причиною браку при фрезеруванні фанери. Зменшення рівня браку від 5-10% (при поганих режимах) до менше 1% дає значну економію матеріалу.

3. Підвищення привабливості продукту. Стабільно висока якість обробки є прямою конкурентною перевагою на ринку меблевих виробів.

Оптимальні режими, визначені за методологією поверхні відгуку, забезпечують високу якість без критичного зниження продуктивності:

1. Використання  $n=24000$  об/хв (максимум верстата) дозволяє збільшити частоту різання, зменшуючи силу різання на одну кромку та підвищуючи якість при збереженні високої швидкості.

2. Рекомендована оптимальна подача  $V_f=5500-7000$  мм/хв є значно вищою, ніж мінімальна експериментальна ( $V_f=3000$  мм/хв). Це означає, що, переходячи з неоптимальних режимів на оптимальні, виробництво отримує приріст продуктивності без втрати якості.

Фрезерування фанери на верстатах із ЧПК при максимальних обертах вимагає суворого дотримання заходів безпеки:

Безпека обладнання та інструменту:

1. Необхідно забезпечити справність та використання захисних кожухів та огорожень, які блокують викид стружки та уламків інструменту.

2. Критично важливим є надійне та правильне кріплення фрези у патроні/цанзі. Ненадійно закріплений інструмент може призвести до його руйнування та травмування.

3. Використання збалансованого різального інструменту для мінімізації вібрацій, які можуть призвести до погіршення якості та передчасного зносу шпинделя.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).

1. Обробка фанери (особливо з клеєм) генерує велику кількість дрібного деревного пилу та аерозолів. Обов'язковим є використання респіраторів (мінімум FFP2) та ефективної системи аспірації.

2. Робота шпинделя створює високий рівень шуму. Персонал, що знаходиться поблизу верстата, повинен використовувати протишумові навушники або вкладиші.

3. Використання захисних окулярів або щитків для захисту від випадкового викиду стружки чи уламків матеріалу.

Організаційні та технологічні заходи.

1. Фанера повинна бути надійно зафіксована на робочому столі (наприклад, вакуумним або механічним кріпленням), щоб запобігти її зміщенню або викиду під час високошвидкісного різання.

2. Оператор повинен перебувати на безпечній відстані під час роботи верстата. Забороняється обслуговування, вимірювання чи прибирання зони різання під час активної роботи шпинделя.

3. Регулярна перевірка та обслуговування верстата, особливо шпинделя та систем аспірації, для забезпечення стабільної та безпечної роботи в умовах високошвидкісних оптимальних режимів.

На основі експериментальних даних побудована адекватна поліноміальна регресійна модель другого порядку ( $R^2 > 0.90$ ), що відображає складну взаємодію факторів, включаючи значущу взаємодію  $X_2$ ,  $X_3$ . Застосування методу відгуку поверхні шляхом диференціювання моделі дозволило точно знайти абсолютний теоретичний максимум якості ( $Y_{max} \approx 4.85$  балів) у межах досліджуваного діапазону.

## ВИСНОВКИ

Проведене дослідження, що включало планування експерименту, статистичний аналіз ANOVA та оптимізацію за методологією поверхні відгуку, дозволило кількісно оцінити вплив режимів фрезерування на якість поверхні березової фанери та визначити технологічні параметри для досягнення максимальної ефективності.

Статистичний аналіз підтвердив, що на інтегральну оцінку якості поверхні впливають усі досліджувані технологічні фактори, проте їхня значущість не є рівномірною. Напрямок фрезерування виявився найбільш критичним фактором, що має найбільший коефіцієнт у регресійній моделі та визначає головну варіацію якості. Це підкреслює технологічну перевагу попутного фрезерування як обов'язкової умови для мінімізації виривів волокон і досягнення високої якості. Робоча подача є другим за важливістю фактором, що чітко вказує на нелінійну залежність та наявність певного оптимального діапазону подачі на зуб, який необхідно дотримуватися для запобігання як термічному навантаженню, так і великим сколам.

На основі експериментальних даних побудована адекватна поліноміальна регресійна модель другого порядку ( $R^2 > 0.90$ ), що відображає складну взаємодію факторів, включаючи значущу взаємодію  $X_2$ ,  $X_3$ . Застосування методу відгуку поверхні шляхом диференціювання моделі дозволило точно знайти абсолютний теоретичний максимум якості ( $Y_{max} \approx 4.85$  балів) у межах досліджуваного діапазону. Цей максимум досягається при одночасному виконанні трьох умов: попутне фрезерування; використання максимально доступної частоти обертів; та встановлення оптимальної робочої подачі. Таким чином, режим максимальних обертів виконує також функцію компенсації, дозволяючи підтримувати високу якість навіть у менш сприятливих умовах при зустрічному фрезеруванні.

Результати оптимізації були переведені у практичні технологічні рекомендації, які забезпечують найкращий баланс між якістю та продуктивністю. Техніко-економічне обґрунтування підтвердило, що впровадження оптимальних режимів є економічно доцільним. Головний

економічний ефект досягається за рахунок високої якості поверхні ( $\bar{Y} \geq 4.5$ ), що дозволяє повністю виключити або значно скоротити необхідність у шліфуванні перед фінішним оздобленням. Це забезпечує значну економію часу, ресурсів та зниження рівня браку.

Зважаючи на те, що оптимальні режими передбачають роботу шпинделя на максимальних обертах, впровадження цих режимів вимагає суворого дотримання заходів охорони праці. Першочерговим є забезпечення надійного кріплення різального інструменту та збалансованість фрез для уникнення аварійних ситуацій, спричинених вібрацією та руйнуванням. Обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту таких як, респіраторів FFP2 (для захисту від фанерного пилу) та протишумових навушників (для захисту від високого рівня шуму).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безпека меблів Монтессорі: рекомендації та найкращі практики. *Xiha Montessori*. URL: <https://xihamontessori.com/uk/Рекомендації-та-найкращі-практики-безпеки-меблів-Монтессорі/>(дата звернення: 01.11.2025).
2. Ґатунок фанери. Статті компанії «Вуд Вей Експерт». "Вуд Вей Експерт" - контакти, товари, послуги, ціни. URL: <https://wood-way.expert/ua/a494394-sorta-fanery.html>(дата звернення: 01.11.2025).
3. Меблі в стилі Монтессорі для дітей з особливими потребами. *Xiha Montessori*. URL: <https://xihamontessori.com/uk/Меблі-за-стилем-Монтессорі-для-дітей-з-особливими-потребами/>(дата звернення: 01.11.2025).
4. Нестінгова фреза з покриттям CL-07 6x22x12 L75 HD (Тайвань) для розкрою ДСП, МДФ, фанери | Купити в Україні. *Stancomplect*. URL: <https://stancomplect.com/nestingova-freza-cl-07-6h22h12-l75-z-pokrittuyam-dlya-rozkroyu-dsp-mdf-faneri-hd-tayvan>(дата звернення: 02.11.2025).
5. Обробний центр з ЧПК KN-3710DE (DELTA + шпіндель KDT + свердлильна група + револьверна зміна інструменту) | Купити в Україні. *Stancomplect*. URL: <https://stancomplect.com/obrobniy-centr-z-chpk-kn-3710de-delta-shpindel-kdt-sverdliilna-grupa-revolverna-zmina-instrumentu>(дата звернення: 23.11.2025).
6. Пінчевська О.О., Головач В.М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни: «Інноваційні технології з оброблення деревини» / Пінчевська О.О., Головач В.М. – Київ: НУБіП України. 2021. 64с.
7. Режими для фрез по металу, алюмінію, дереву, пластику. *Market-Tool - оснастка та інструмент*. URL: [https://market-tool.com.ua/rezhymy-dlia-frez-po-metalu-aliuminiiu-derevu-plastyku/?srsltid=AfmBOor\\_bmETuiSr-Aat2W690YL4duEAXZ38yCmFejxRh6d0WjugREq3](https://market-tool.com.ua/rezhymy-dlia-frez-po-metalu-aliuminiiu-derevu-plastyku/?srsltid=AfmBOor_bmETuiSr-Aat2W690YL4duEAXZ38yCmFejxRh6d0WjugREq3)(дата звернення: 02.11.2025).
8. Фанера 12x1250x2500 мм, сорт - 2/3 (BB/WG) Riga купити в Україні (Київ) - ціни в інтернет-магазині SISU. *SISU – продажа и импорт фанеры, OSB*,

QSB в Києві. URL: <https://sisu.com.ua/ua/products/fanera-12x1250x2500-mm-sort-23-bbwg-riga-as-latvijas-finieris>(дата звернення: 23.11.2025).

9. Фрезерний верстат з ЧПК Beta 2/4SM Андис Техно: веб-сайт. URL: <https://old.andistechno.com/frezernye-stanki-s-chpu/frezernyj-stanok-s-chpu-beta-3s.html>

10. Фрезерний верстат з ЧПК CNC ADF1208 Домінант: веб-сайт. URL: <https://dominant-cnc.com/ua/p581076267-frezernyj-stanok-chpu.html?srsltid=AfmBOorX0cGBcDpswCr2lq48d3aAtQ-ciXPXYBXF3iivNA9xTZEe5FIq>

11. Фрезерний верстат з ЧПК Javelin 1525 DW: веб-сайт. URL: [https://javelin-cnc.com.ua/ua/frezernye-stanki-chpu/tproduct/470009951-343172641921-frezernii-verstat-z-chpu-javelin-1525-dw?srsltid=AfmBOorbx\\_QkXft45k7xtjxxRsfu-9aygmOS12rplNIYxbzCUOOTnsbW](https://javelin-cnc.com.ua/ua/frezernye-stanki-chpu/tproduct/470009951-343172641921-frezernii-verstat-z-chpu-javelin-1525-dw?srsltid=AfmBOorbx_QkXft45k7xtjxxRsfu-9aygmOS12rplNIYxbzCUOOTnsbW)

12. Шорнікова С. В. Шорсткість поверхні як одна із основних геометричних характеристик якості поверхні деталей. методи та засоби контролю. *Таврійський науковий вісник. Серія: технічні науки*. 2022. № 5. С. 13–20. URL: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.2>(дата звернення: 23.11.2025).

13. Asilturk, I.; Cunkas, M. 2011. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Syst Appl* 38(5): 5826-5832. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.041>

14. ASTM. 1994. Standard test methods for conducting machining tests of wood and wood-base materials. ASTM. D 1666-87. 1994. ASTM Standards: PA, USA. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1666-87R04.htm>

15. Atanasov V. Experimental research on the cutting force during longitudinal milling of solid wood and wood-based composites. *Zvolen, technická univerzita vo zvolene*. 2021. Vol. 63, no. 2. P. 73–84.

16. Balachandran B, Zhao MX (2000) A mechanics based model for study of dynamics of milling operations. *Meccanica* 35:89–109

17. Bonac, T. 1979. Wood roughness volume and depth estimated from pneumatic surface measurements. *Wood Sci* 11: 227-232. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL7960435484>
18. Burdurlu, E.; Usta, I.; Ulupinar, M.; Aksu, B.; Erarslan, T.Ç. 2005. The effect of the number of blades and the grain size of abrasives in planing and sanding on the surface roughness of European black pine and Lombardy poplar. *Turk J Agric For* 29(4): 315-322. <http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/issues/tar-05-29-4/tar-29-4-11-0403-12.pdf>
19. Çakiroğlu E. O. Prediction of dust emissions during CNC milling of spruce and pine with machine learning. *European journal of wood and wood products*. 2025. Vol. 83, no. 5. URL: <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02306-z>(date of access: 23.11.2025).
20. Chen H.-Y., Chen C. A study of the response surface methodology model with regression analysis in three fields of engineering. *Applied system innovation*. 2025. Vol. 8, no. 4. P. 99. URL: <https://doi.org/10.3390/asi8040099>(date of access: 23.11.2025).
21. CNC Router Machine FS1212A - FORSUN. FORSUN: веб-сайт. URL: <https://forsuncnc.com/2021-new-compact-cnc-router-machine-fs1212/>
22. De Deus, P.R.; de Sampaio Alves, M.C.; Vieira, F.H.A. 2015. The quality of MDF workpieces machined in CNC milling machine in cutting speeds, feedrate, and depth of cut. *Meccanica* 50(12): 2899-2906. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0187-z>
23. Demir A., Cakiroglu E. O., Aydin I. Effects of CNC processing parameters on surface quality of wood-based panels used in furniture industry. *Drvna industrija*. 2022. Vol. 73, no. 4. P. 363–371. URL: <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2109>(date of access: 23.11.2025).
24. DIN. 1990. Determination of values of surface roughness parameters Ra, Rz, Rmax using electrical contact (Stylus) instruments, Concepts and measuring conditions. DIN. 4768. 1990. Deutsches Institut für Normung: Berlin,

Germany. [https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/din-4768-e-1990-383197\\_saig\\_din\\_din\\_870873/](https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/din-4768-e-1990-383197_saig_din_din_870873/)

25. Effects of cutting parameters and grain direction on surface quality of three wood species obtained by CNC milling / A. Ibrisevic et al. *Bulletin of the transilvania university of brasov. series II: forestry • wood industry • agricultural food engineering*. 2023. P. 127–140.

URL: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.3.9>(date of access: 23.11.2025).

26. Experimental investigation of tool vibration and surface roughness in the precision end-milling process using the singular spectrum analysis / C.-C. Chen et al. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2012. Vol. 63, no. 5-8. P. 797–815. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3943-4>(date of access: 23.11.2025).

27. Ferraresi D (1977) *Fundamento Da Usinagem Dos Metais*. Edgard Blücher, São Paulo

28. Gawroński, T. 2013. Optimisation of CNC routing operations of wooden furniture parts. *Int J Adv Manuf Tech* 67(9-12): 2259-2267. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4647-5>

29. Gayda S. Шорсткість поверхні деревини. *Ukrainian national forestry university*. 2025.

30. Hanincová L., Procházka J., Novák V. Comparative analysis of cutting forces in CNC milling of MDF: the role of tool coatings, cutting speed, and feed per tooth. *Coatings*. 2024. Vol. 14, no. 9. P. 1085. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings14091085>(date of access: 23.11.2025).

31. Haykin, S. 1994. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR: Upper Saddle River, NJ, United States. <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/541500>

32. Hazir, E.; Koc, K.H. 2016. Optimization of wood surface machining parameters in CNC routers: Response surface methodology (RSM) approach. *Int J Sci Eng Technol* 5: 1-8. [ Links ]

33. Hazir, E.; Koc, K.H. 2018. A modeling study to evaluate the quality of wood surface. *Maderas-Cienc Tecnol* 20(4): 691-702. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005041501>
34. Hazir, E.; Koc, K.H. 2019. Optimization of wood machining parameters in CNC routers: Taguchi orthogonal array based simulated angling algorithm. *Maderas-Cienc Tecnol* 21(4): 493-510. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000406>
35. Hazir, E.; Ozcan, T. 2019. Response surface methodology integrated with desirability function and genetic algorithm approach for the optimization of CNC machining parameters. *Arab J Sci Eng* 44(3): 2795-2809. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3559-6>
36. Identification of optimal cutting parameters regarding lacquer wettability of CNC processed MDF panels by artificial neural network / A. Demir et al. *Wood Material Science & Engineering*. 2024. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2426780>(date of access: 23.11.2025).
37. Kant, G.; Sangwan, K.S. 2015. Predictive modelling and optimization of machining parameters to minimize surface roughness using artificial neural network coupled with genetic algorithm. *Procedia CIRP* 31: 453-458. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.043>
38. Kilic, M.; Hiziroglu, S.; Burdurlu, E. 2006. Effect of machining on surface roughness of wood. *Build Environ* 41(8): 1074-1078. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.008>
39. Koc, K.H.; Erdinler, E.S.; Hazir, E.; Ozturk, E. 2017. Effect of CNC application parameters on wooden surface quality. *Measurement* 107: 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.001>
40. Kumar, S.L. 2018. Experimental investigations and empirical modeling for optimization of surface roughness and machining time parameters in micro end milling using Genetic Algorithm. *Measurement* 124: 386-394. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.056>
41. Litak G (2002) Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos Solut Fractal* 13:1531–1535

42. Methodology of Temperature Monitoring in the Process of CNC Machining of Solid Wood / R. Igaz et al. *Sustainability*. 2018. Vol. 11, no. 1. P. 95. URL: <https://doi.org/10.3390/su11010095>(date of access: 23.11.2025).
43. Munbrun B. D., Aidoo A. A. Anowa. *Books abroad*. 1971. Vol. 45, no. 2. P. 363. URL: <https://doi.org/10.2307/40125446>(date of access: 23.11.2025).
44. Pelit H., Korkmaz M., Budakçı M. Surface roughness of thermally treated wood cut with different parameters in CNC router machine. *BioResources*. 2021. Vol. 16, no. 3. P. 5133–5147. URL: <https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5133-5147>(date of access: 23.11.2025).
45. Sen AK, Litak G, Syta A, Rusinek R (2013) Intermittency and multiscale dynamics in milling of fiber reinforced composites. *Meccanica* 48:783–789
46. Shibata M. Response surface methodology. *Nippon shokuhin kagaku kogaku kaishi*. 2013. Vol. 60, no. 12. P. 728–729. URL: <https://doi.org/10.3136/nskkk.60.728>(date of access: 23.11.2025).
47. The effect of the feed rate and revolutions of the cutting tool on the amounts of created chips in dust and respirable sizes from milling particleboards, and medium-density fibreboards / M. Juda et al. *Global Forest Journal*. 2024. Vol. 2, no. 02. P. 147–160. URL: <https://doi.org/10.32734/gfj.v2i02.16735>(date of access: 23.11.2025).
48. The Effect of Average Chip Thickness on The Potentially Respirable Dust from CNC Finish Milling of Wood-Based Materials / M. Pędzik et al. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*. 2024. URL: <https://doi.org/10.53502/wood-192161>(date of access: 23.11.2025).
49. Wachowicz J., Bałaga Z., Podziewski P. Wear characteristics of wc-co cutting tools obtained by the U-FAST method during particleboard milling. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 16. P. 3907. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18163907>(date of access: 23.11.2025).
50. Warminski et al (2003) Approximate analytical solutions for primary chatter in the non-linear metal cutting model. *J Sound Vib* 259(4):917–933

51. R.H.O. Plywood. *Journal of the Franklin Institute*. 1937. Vol. 224, no. 6. P. 801–802. URL: [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(37\)90574-x](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(37)90574-x)(date of access: 23.11.2025).

52. Фреза кінцева однозахідна A1LX D6\*I22\*L50 UA. *frezycnc*. URL: <https://frezycnc.in.ua/products-uk/фреза-кінцева-однозахідна-a1lx-d6i22l50-ua>.

53. CNC Router Machine FS1212A - FORSUN. FORSUN: веб-сайт. URL: <https://forsuncnc.com/2021-new-compact-cnc-router-machine-fs1212/>