



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.36930/412620>
Article received 2025.11.18
Article revised 2026.02.23
Article accepted 2026.04.16
Article published 2026.05.22

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Yevstakhii Myskiv
myskivs@i.ua
103 General Chuprynka St.,
Lviv, 79057, Ukraine

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



УДК 674.05:621.914.3-529

Вплив діаметра інструмента та швидкості його подачі на час виготовлення гнізда для замка в дверному полотні на верстаті з ЧПК

Є.М. Миськів¹, Р.Г. Барабаш², А.А. Калина³

Українська деревообробна промисловість має доступ до найсучасніших машин та обладнання з числовим програмним керуванням (ЧПК), однак галузь часто не може повною мірою використати цей потенціал, що призводить до прийняття неоптимальних рішень на виробництві. Формування вартості дверних блоків, а особливо – дверних полотен для кінцевого споживача значною мірою залежить від собівартості виробу на етапі його виробництва, тобто від кількості сировинних, енергетичних, логістичних, часових, трудових та інших ресурсів, які затрачено в процесі виготовлення цієї продукції.

Здійснено аналіз ефективності використання інструменту різного діаметра в контексті порівняння траєкторії його переміщення та впливу на виробничий час виготовлення замкового гнізда, що формується під час оброблення дверного полотна на верстаті з ЧПК із використанням агрегату для цієї операції. За результатами дослідження сформовано рекомендації для вибору діаметра різального інструмента з урахуванням критеріїв ресурсоощадності виготовлення дверного полотна.

Розроблено математичну модель для прогнозування витрати часу на виготовлення гнізд під замок. Математична модель описує залежності часу виготовлення замкового гнізда від геометричних параметрів, траєкторії переміщення різального інструменту та розмірів самого гнізда. Встановлено коефіцієнт швидкості інструмента, який враховує нелінійність швидкості переміщення приводів по осях верстата з ЧПК за зміни напрямку руху. Усереднене значення коефіцієнта швидкості ($K_{\text{швидкості}}$) становить 0,75611 для подачі 10м/хв, що зумовлено неможливістю досягнути заданої подачі через невеликі відстані переміщення інструменту в замковому гнізді.

¹ Миськів Євстахій Михайлович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: myskivs@i.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1762-4728>

² Барабаш Руслан Григорович – аспірант кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: barabash.r@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5533-6889>

³ Калина Артем Анатолійович – аспірант кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: kalyna.a@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8191-9800>

Ключові слова: *ресурсоощадність; технологічний процес; дверний блок; пакування; агрегат 4-ої осі; діаметр інструмента; виробничий час; коефіцієнт швидкості; оптимізація процесів; міжкімнатні двері.*

Вступ (Introduction).

У процесі виготовлення дверних блоків кількість ресурсозатрат значною мірою залежить від обраної технології виробництва, характеристик наявного обладнання та його технологічних параметрів, організації самого виробництва тощо. Запровадження заходів зі зменшення додаткових переміщень заготовок між операціями технологічного процесу виготовлення дверей має ресурсоощадний та економічний ефект (Czerwińska & Grebski, 2021), а також зумовлює зменшення виробничого часу загалом. Окрім того, моніторинг завантаженості обладнання на лінії виготовлення дверей та аналіз процесу дають можливість впливати на різних етапах та покращувати його ефективність використання (Czerwińska & Pacana, 2019). Для зменшення виробничого часу і тим самим зменшення ресурсозатратності загалом, особливу увагу варто приділити моніторингу та аналізу найбільш трудо- і часозатратній операції у процесі виготовлення дверей – етапу виготовлення гнізд під дверну фурнітуру.

На ресурсозатратність процесу формування гнізд під дверну фурнітуру мають вплив низка чинників і технологічних параметрів, куди варто віднести тип обладнання, параметри інструменту, розміри і тип фурнітури тощо. Можливість прогнозування витрат часу на процес формування гнізд під дверну фурнітуру з урахуванням міри впливу усіх факторів і технологічних параметрів дасть змогу змінювати та обирати ці технологічні параметри, тим самим підвищуючи ресурсоощадність виробництва дверей загалом.

Деревообробна галузь України є сферою, де високі технології привертають особливий інтерес. Раціональний підбір обладнання є технологічно важливим чинником, адже це складатиме фундамент всього технологічного процесу виготовлення виробу. Для прикладу, Gola et al. (2011) описують чотирьохетапну методологію вибору верстата (машини) для цілеспрямованої гнучкої виробничої системи.

Для виробництва дверних блоків на ринку деревообробки існує широкий ряд високопродуктивного спеціалізованого обладнання, ефективність якого підтверджено дослідницьким шляхом (Kwidziński et al., 2021; Kwidziński et al., 2023). Як один із варіантів упровадження спеціалізованого обладнання для фрезерування гнізд під замки та завіси розглядають обладнання SBK300 виробника Homag Group. Для підвищен-

ня продуктивності та гнучкості обладнання такого типу необхідне впровадження додаткового оснащення, наприклад такого, як додатковий поворотний стіл (Jiang et al., 2014).

У деревообробній галузі України під час індивідуального виробництва дверей більш поширеним є використання універсального обладнання, а саме 4- та 5-осьових обробних центрів з числовим програмним керуванням (ЧПК), що сприяє гнучкості самого виробництва. Ashley (2016) зазначає, що впровадження інноваційних підходів у проєктуванні та використанні гнучких виробничих технологій, зокрема верстатів із ЧПК, забезпечує підвищення конкурентоспроможності виробників. Для виготовлення в дверному полотні гнізд під фурнітуру на 4-осьових обробних центрах з ЧПК необхідним є використання додаткових агрегатів 4-ої осі. Прикладом таких агрегатів 4-ої осі можуть бути агрегати компанії-виробника ATEMAg Aggregatetechnologie und Manufaktur AG.

Важливими чинниками, що впливають на результат механічного оброблення, є оптимальний розрахунок режимів роботи та вибір різального інструмента (Lopez de Lacalle, et al., 2015; Gisip, et al., 2026). Під час створення управляючих програм вибірки гнізд під дверну фурнітуру з використанням агрегатів 4-ої осі, потрібно враховувати діаметр інструменту, оскільки він має прямий вплив на траєкторію руху інструменту.

За умов рівності діаметра інструмента ширині гнізда, траєкторія руху інструмента є простим переміщенням в межах однієї площини (рис. 1a). За умов, коли діаметр інструмента менший ніж ширина заданого гнізда, переміщення інструмента відбувається за складною спіралеподібною траєкторією (рис. 1b). Важливо також враховувати, що зміна діаметра фрези після заточування призведе до необхідності змінити траєкторію руху навіть за умови, коли зміна діаметра інструменту є незначною.

Отже, діаметр інструменту є важливим технологічним параметром, який впливає на траєкторію переміщення під час виготовлення гнізд під дверну фурнітуру. Зміна траєкторії переміщення інструменту, своєю чергою, впливає на витрати часу для виготовлення гнізд, а відповідно – і на загальний виробничий час. Зменшення витрат виробничого часу є одним із напрямів впровадження ресурсоощадності на виробництві.

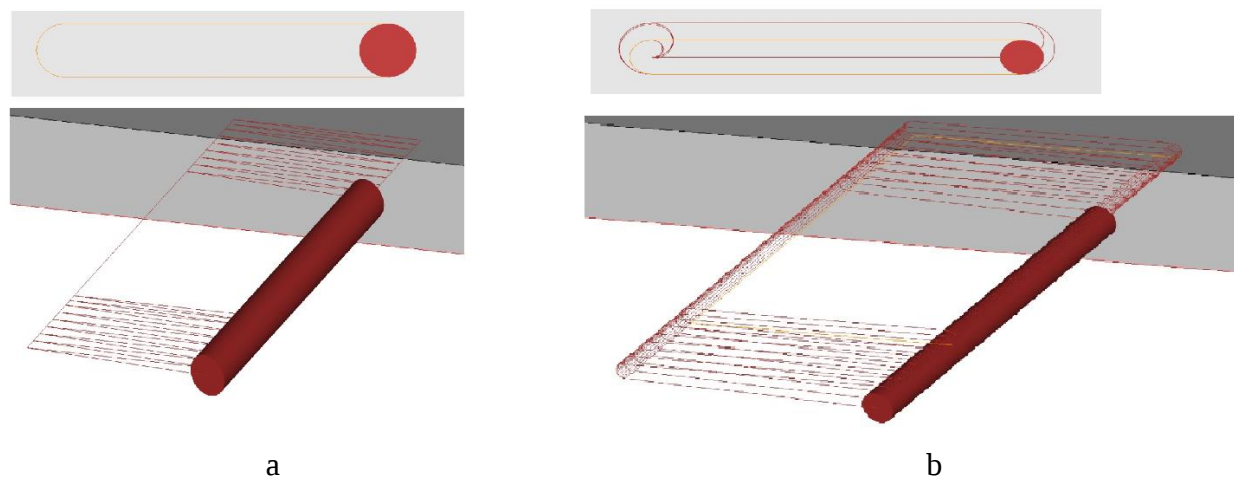


Рис. 1. Знімок екрана програмного забезпечення WoodFlash з візуалізацією траєкторії переміщення різального інструменту

a – діаметр інструмента співпадає із заданою шириною гнізда
b – діаметр інструмента не співпадає із заданою шириною гнізда

Fig. 1. Screenshot of the WoodFlash software illustrating the cutting tool trajectory

a – the tool diameter matches the specified mortise width
b – the tool diameter does not match the specified mortise width

Вплив траєкторії руху інструмента на виробничий час також підтверджено результатами досліджень (Narooei & Ramli, 2014; Petrovic et al., 2017), які доводять, що оптимізація траєкторії переміщення інструменту є одним із ефективних способів підвищення ефективності верстатів з ЧПК, скорочення часу обробки та зменшення енергоспоживання.

Схематично залежність виробничого часу від діаметра інструмента і траєкторії його руху представлено на рис. 2.

Ефективне використання фрез значною мірою залежить від правильного вибору їх

розмірних і геометричних параметрів та врахування швидкості різання (Cakmak et al., 2023) для конкретних умов обробки (Yaghoubi et al., 2024). Науковці (Csanády & Magoss, 2020) акцентують увагу на значному впливі діаметра фрези на швидкість різання. Підбір різального інструмента за такого методу базується на режимах обробки як головного чинника. Здавалося б, для підвищення продуктивності обробки доцільно обирати фрези більшого діаметра, проте цьому перешкоджає обернено пропорційна залежність між частотою обертання та діаметром інструмента за фіксованої швидкості різання.

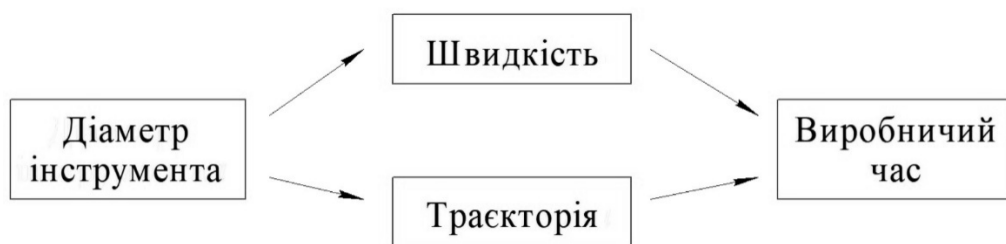


Рис. 2. Схеми впливу діаметра інструмента на виробничий час
Fig. 2. Diagram illustrating the effect of cutting tool diameter on production time

Під час вибору фрези потрібно врахувати також той аспект, що збільшення її діаметра спричиняє деяке подовження шляху врізування і перебігання, що, відповідно, знижує продуктивність обробки.

Таким чином, вибір діаметра різального інструмента зумовлює зміну траєкторії його переміщення, що в підсумку визначає тривалість виготовлення виробу та загальний виробничий час. Можливість прогнозування витрати часу для різних траєкторій переміщення інструмента

певного діаметра за різних поставлених задач матиме важливе значення для ресурсоощадності у виробництві дверних полотен.

Актуальність дослідження полягає в тому, що діаметр різального інструмента, який використовують для виготовлення гнізда в дверному полотні, має істотний вплив на витрати часу певної технологічної операції і, як наслідок, на ресурсоощадність виготовлення дверного полотна через безпосередній вплив на форму і довжину траєкторії переміщення інструменту.

Дослідження, що пов'язані з розрахунком оптимальної швидкості обертання різального інструменту, розміру подачі та глибини оброблення за прохід, описують вплив на витрати часу не повною мірою за рахунок наявності складних ділянок траєкторії переміщення, на яких досягнення сталої швидкості подачі є неможливим унаслідок технологічних обмежень обладнання. Наявність, форма та кількість ділянок траєкторії переміщення різального інструменту залежить від його діаметра не лінійно. Дослідження впливу цього фактора на прогнозування витрат часу виготовлення гнізда під замок у дверному полотні шляхом побудови математичної моделі залишається недостатньо вивченим і має суттєве практичне значення, а також впливає на ресурсоощадність технологічного процесу виготовлення дверних полотен.

Мета досліджень полягає у розробленні математичної моделі для прогнозування витрати часу на виготовлення гнізд під замок за умов різних траєкторій переміщення інструмента різного діаметра.

Об'єкти і методика досліджень (Objects and methods)

Об'єкт дослідження – процес виготовлення гнізд під замок у дверному полотні на верстаті з числовим програмним керуванням. *Предмет дослідження* – витрати часу на виготовлення гнізд під замок за умов різних траєкторій переміщення інструмента різного діаметра.

Час виготовлення гнізда під замок агрегатом 4-ої осі на верстаті з ЧПК вміщує три складові, а саме, час переміщення інструмента до місця обробки, час фрезерування гнізда та час виходу інструмента із заготовки:

$$T = T_{\Pi} + T_{\Phi} + T_{\text{В}} \quad (1)$$

де T_{Π} – час переміщення інструмента до місця обробки, с; T_{Φ} – час фрезерування гнізда, с; $T_{\text{В}}$ – час виходу інструмента з гнізда, с.

Час переміщення T_{Π} до місця фрезерування для різного обладнання є різним. На час переміщення впливає розташування агрегата в магазині, положення самого магазину (на станині, на рухомій частині верстату з ЧПК) тощо.

Час виходу інструмента з гнізда $T_{\text{В}}$ залежить від глибини гнізда. Тривалість цього етапу залежить від швидкості переміщення інструмента, яка задана програмним забезпеченням конкретного верстата з ЧПК та глибину гнізда.

Час фрезерування гнізда T_{Φ} встановлювали як відношення довжини траєкторії переміщення інструмента до швидкості його переміщення, що задана параметрами верстату:

$$T_{\Phi} = \frac{L_{\text{ТР}}}{V \cdot K_{\text{швидкості}}} \quad (2)$$

де $L_{\text{ТР}}$ – довжина траєкторії переміщення інструмента, мм; V – робоча швидкість переміщення інструмента, м/хв; $K_{\text{швидкості}}$ – коефіцієнт швидкості інструмента, який враховує нелінійність швидкості переміщення по осях приводів верстата з ЧПК, а саме, етапи розгону та гальмування приводів під час зміни напрямку руху (Калина, Миськів, 2024). Залежно від обраної швидкості подачі, цей коефіцієнт має різне значення та визначається експериментальним шляхом.

Під час фрезерування гнізда під замок переміщення інструмента відбувається за траєкторією у формі прямокутника (по периметру гнізда) з поступовим заглибленням, тобто "спіралеподібно". За кожен «виток» відбувається врізання інструмента на глибину заданого кроку (рис. 3). Такий спосіб фрезерування зменшує навантаження на агрегат та мінімізує осьові навантаження на інструмент, а також не потребує додаткових витрат часу на заглиблення інструменту. Отже, для визначення затрат часу на фрезерування гнізда під замок врахували довжину траєкторії, що визначена як добуток довжини периметра прямокутника $O_1O_2O_3O_4(P)$ та кількість таких повторювань (кроків) (n) залежно від заданої глибини гнізда під замок:

$$L_{\text{ТР}} = P \cdot n \quad (3)$$

Кількість повторень (n) – це відношення глибини пазу (H) до кроку врізання (S), але результат цього співвідношення завжди округлюють вгору до найближчого цілого числа (функція стелі):

$$n = \lceil \frac{H}{S} \rceil \quad (4)$$

$$P_{O_1O_2O_3O_4} = 2(b_T + l_T) = 2(B + L - 2D) \quad (5)$$

де b_T – ширина траєкторії переміщення, мм; l_T – довжина траєкторії переміщення, мм; B – ширина замкового гнізда, мм; L – довжина замкового гнізда, мм; D – діаметр фрези, обраної для фрезерування замкового гнізда, мм.

Отже, затрати часу на виготовлення гнізда під замок у дверному полотні визначили за наступною математичною залежністю:

$$T_{\Phi} = 0,12 \cdot \frac{(B+L-2D) \cdot \lceil \frac{H}{S} \rceil}{V \cdot K_{\text{швидкості}}}, \text{ с} \quad (6)$$

$$T = T_{\Pi} + 0,12 \cdot \frac{(B+L-2D) \cdot \lceil \frac{H}{S} \rceil}{V \cdot K_{\text{швидкості}}} + T_{\text{В}}, \text{ с} \quad (7)$$

Ця математична залежність дає змогу прогнозувати затрати часу під час виготовлення гнізда під замок у дверному полотні на обладнанні різного типу, і, як наслідок, змінювати необхідні параметри для мінімізації витрат часу.

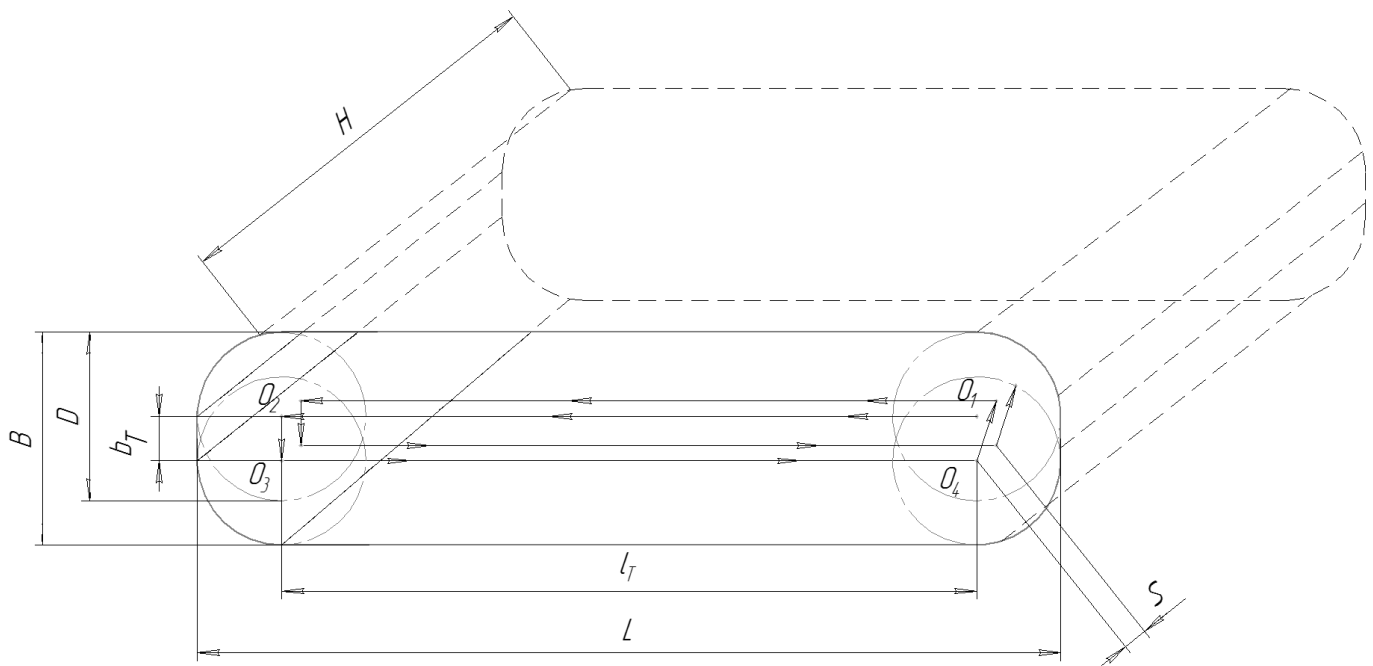


Рис. 3. Схема розрахунку траєкторії переміщення інструмента
Fig. 3. Tool movement trajectory calculation scheme

Для перевірки достовірності отриманої математичної моделі провели експериментальні дослідження у виробничих умовах. Експериментальні дослідження виконали з використанням

агрегату 4-ої осі на обробному центрі з ЧПК Format4 Profit H200. Для формування гнізд під замок у дверному полотні використали інструмент діаметром: 12; 14; 16 та 18 мм (рис. 4).



Рис. 4. Загальний вигляд ріжучого інструменту
Fig. 4. General view of the cutting tool

Повели фрезерування гнізд трьох типорозмірів завглибшки 50, 70 і 90 мм та трьох типорозмірів завдовжки 80, 100 і 120 мм, що є найбільш поширеними розмірами гнізд, про що свідчить додатковий аналіз типорозмірів дверних замків (DIN 18251:2020-04; Tobias, 2015). Ширину гнізда прийняли у 18 мм, що відповідає максимальному значенню у цих виробничих умовах. В кожному досліді провели п'ять вимірювань, на основі яких встановили

середній час виготовлення гнізда заданих розмірів при застосуванні інструмента визначеного діаметра. Сумарно виготовили більше 150 замкових гнізд для різних значень швидкості переміщення інструмента. Параметри швидкості переміщення інструмента і крок заглиблення обрали згідно допустимих характеристик використовуваного агрегату 4-ої осі. Крок заглиблення становив 6 мм, а швидкості переміщення – 1; 2; 3; 5; 7 і 10 м/хв.

Результати (Results)

Результати експериментальних досліджень у виробничих умовах засвідчили, що затрати часу на фрезерування гнізда залежать від його геометричних розмірів, а також діаметра та швидкості подачі інструмента, що використовувався для фрезерування цього гнізда. Зі

збільшенням розмірів гнізда виробничий час збільшується, але за умови збільшення діаметра інструмента – зменшується. У випадку заміни одразу трьох параметрів (геометричні розміри, діаметр та швидкість подачі) результати експериментальних досліджень мають складну нелінійну залежність (табл. 1).

Таблиця 1. Результати експериментальних досліджень

Table 1. Results of experimental studies

№	Діаметр фрези, мм	Параметри гнізда		Час фрезерування гнізда T_{ϕ} , с						
		шириною В=18 мм								
		Глибина гнізда Н, мм	Довжина гнізда L, мм	Швидкість подачі агрегату 1 м/хв	Швидкість подачі агрегату 2 м/хв	Швидкість подачі агрегату 3 м/хв	Швидкість подачі агрегату 5 м/хв	Швидкість подачі агрегату 7 м/хв	Швидкість подачі агрегату 10 м/хв	
1	12	50	80	80,7	41,0	28,0	18,0	14,2	11,6	
2			100	102,2	51,8	35,2	22,4	17,3	13,7	
3			120	123,8	62,6	42,4	26,7	20,3	15,9	
4	14		80	76,4	38,9	26,6	17,2	13,5	11,0	
5			100	97,9	49,6	33,8	21,5	16,5	13,0	
6			120	119,5	57,4	40,9	25,8	19,6	15,2	
7	16		80	72,0	36,7	25,1	16,2	12,6	10,3	
8			100	93,6	47,5	32,3	20,6	15,7	12,5	
9			120	115,2	58,3	39,5	24,9	18,8	14,5	
10	18		80	67,6	34,2	23,2	14,6	11,1	8,8	
11			100	89,1	44,9	30,4	18,9	14,2	10,9	
12			120	110,7	55,7	37,6	23,2	17,3	13,1	
13	70	90	80	107,6	54,7	37,4	24,1	18,9	15,4	
14			100	136,3	69,0	47,0	29,8	23,0	18,2	
15			120	165,1	83,4	56,5	35,6	27,1	21,1	
16			14	80	101,8	51,8	35,4	22,9	18,0	14,6
17				100	130,6	66,2	45,0	28,7	22,1	17,5
18				120	159,4	84,6	54,6	34,4	26,2	20,4
19			16	80	96,1	48,9	33,5	21,7	16,9	13,6
20				100	124,8	63,3	43,1	27,4	21,0	16,5
21				120	153,6	77,7	52,7	33,2	25,1	19,4
22			18	80	90,1	45,6	30,9	19,4	14,8	11,6
23				100	118,8	59,9	40,4	25,2	18,9	14,6
24				120	147,6	74,3	50,0	30,9	23,0	17,4
25	12	80	134,5	68,4	46,7	30,1	23,7	19,2		
26		100	170,4	86,3	58,7	37,3	28,8	22,8		
27		120	206,4	104,3	70,7	44,5	33,9	26,4		
28	14	80	127,3	64,8	44,3	28,7	22,5	18,3		
29		100	163,2	82,7	56,3	35,9	27,6	21,9		
30		120	199,2	105,7	68,3	43,1	32,8	25,5		
31	16	80	120,1	61,2	41,9	27,1	21,1	16,9		
32		100	156,0	79,2	53,9	34,3	26,2	20,7		
33		120	192,0	97,1	65,9	41,5	31,4	24,3		
34	18	80	112,6	56,9	38,6	24,3	18,5	14,6		
35		100	148,5	74,9	50,6	31,5	23,6	18,3		
36		120	184,5	92,9	62,6	38,7	28,8	21,8		

З метою вдосконалення математичної моделі (6) за використання результатів досліджень у виробничих умовах здійснено розрахунки коефіцієнта швидкості ($K_{\text{швидкості}}$) для кожного результату експерименту (табл. 2).

Розрахунок значення коефіцієнта швидкості провели для кожної з наведених швидкостей

подачі. Для зручності значення коефіцієнта подали у вигляді графічної залежності від швидкості подачі агрегату для фрезерування замкових гнізд (рис. 5). Зміна коефіцієнта не є лінійною, що підтверджує складний рух переміщення інструмента під час фрезерування по заданій траєкторії.

Таблиця 2. Результати розрахунку коефіцієнта швидкості

Table 2. Results of calculating the feed rate coefficient

№	Діаметр фрези, мм	Параметри гнізда шириною В=18 мм	Розрахункові значення коефіцієнта швидкості K _{швидкості}						
		Глибина гнізда Н, мм	Довжина гнізда L, мм	Швидкість подачі агрегату 1 м/хв	Швидкість подачі агрегату 2 м/хв	Швидкість подачі агрегату 3 м/хв	Швидкість подачі агрегату 5 м/хв	Швидкість подачі агрегату 7 м/хв	Швидкість подачі агрегату 10 м/хв
1	12	50	80	0,9907	0,9744	0,95075	0,88505	0,8063	0,68837
2			100	0,99296	0,9803	0,96164	0,90846	0,84075	0,74048
3			120	0,99443	0,9837	0,96815	0,92225	0,86601	0,7758
4	14		80	0,99018	0,97297	0,94808	0,87958	0,80178	0,68852
5			100	0,99265	0,97944	0,96	0,90503	0,84003	0,74654
6			120	0,99423	1,03502	0,96703	0,91986	0,86501	0,78261
7	16		80	0,98959	0,97138	0,94624	0,87837	0,80624	0,69474
8			100	0,99199	0,97851	0,95733	0,90394	0,84406	0,74602
9			120	0,99375	0,98249	0,96583	0,92063	0,86945	0,78843
10	18		80	0,99112	0,97981	0,96373	0,91852	0,86178	0,76177
11			100	0,9936	0,98531	0,97233	0,93714	0,89157	0,81099
12			120	0,99512	0,98816	0,97764	0,95006	0,9123	0,8422
13	12	70	80	0,99033	0,9744	0,95075	0,88505	0,80459	0,69375
14			100	0,99296	0,9803	0,96082	0,90724	0,84075	0,74211
15			120	0,99419	0,98417	0,96815	0,92328	0,86473	0,77727
16	14		80	0,98979	0,97297	0,94808	0,87958	0,80178	0,69041
17			100	0,99265	0,97944	0,95915	0,90377	0,83851	0,74142
18			120	0,99398	0,93661	0,96633	0,91986	0,86369	0,77647
19	16		80	0,98918	0,97138	0,94511	0,87675	0,80433	0,70088
20			100	0,99231	0,97789	0,95822	0,90262	0,84406	0,74964
21			120	0,99375	0,98249	0,96583	0,92063	0,86945	0,7868
22	18		80	0,99112	0,97981	0,96373	0,92041	0,86411	0,76701
23			100	0,99394	0,98531	0,97329	0,93863	0,89346	0,80877
24			120	0,99539	0,98816	0,97842	0,95006	0,9123	0,8422
25	12	90	80	0,99033	0,9744	0,95075	0,88505	0,80459	0,69375
26			100	0,99296	0,9803	0,96082	0,90724	0,84075	0,74211
27			120	0,99419	0,98417	0,96815	0,92328	0,86473	0,77727
28	14		80	0,98979	0,97297	0,94808	0,87958	0,80178	0,69041
29			100	0,99265	0,97944	0,95915	0,90377	0,83851	0,74142
30			120	0,99398	0,93661	0,96633	0,91986	0,86369	0,77647
31	16		80	0,98918	0,97138	0,94511	0,87675	0,80433	0,70088
32			100	0,99231	0,97789	0,95822	0,90262	0,84406	0,74964
33			120	0,99375	0,98249	0,96583	0,92063	0,86945	0,7868
34	18		80	0,99112	0,97981	0,96373	0,92041	0,86411	0,76701
35			100	0,99394	0,98531	0,97329	0,93863	0,89346	0,80877
36			120	0,99539	0,98816	0,97842	0,95006	0,9123	0,8422

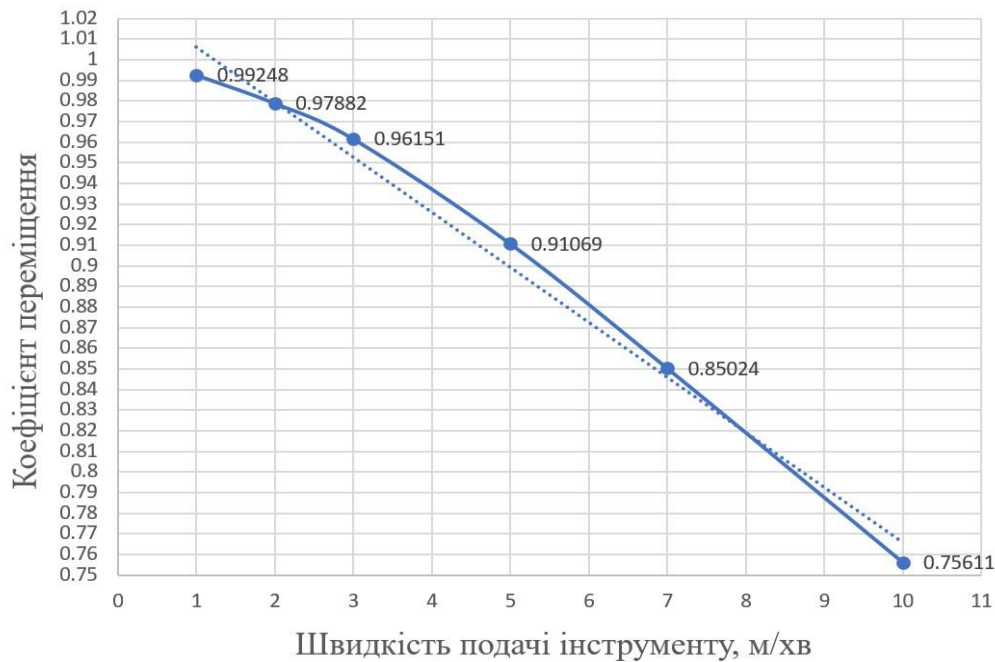


Рис. 5. Залежність коефіцієнта швидкості від швидкості подачі агрегату
 Fig. 5. Dependence of the feed rate coefficient on the feed rate of the machine unit

Аналіз результатів експериментальних досліджень засвідчує, що зі збільшенням швидкості подачі відбувається зміна коефіцієнта швидкості. Варто також звернути увагу, що за умов порівняння гнізд з однакими розмірами за довжиною для одного взятого інструмента відносна частка виробничого часу зростає, але за умов сталого значення глибини гнізда та збільшення його довжини значення виробничого часу у відношенні до часу, взятого як еталон (різальний інструмент з діаметром 18 мм) зменшується, що характеризується як менший вплив діаметра інструмента на виробничий час. Вплив діаметра ріжучого інструмента на виробничий час має менше значення під час фрезеруванні пазів більшої довжини. У випадку фрезерування довгих пазів перевага використання ріжучого інструмента більшого діаметра значно скорочується, що є наслідком збільшення довжини траєкторії в горизонтальному переміщенні (за довжиною) та нівелює значний вплив частини траєкторії для переміщення інструмента по вертикалі (за шириною).

За результатами дослідження з використанням графіка залежності, встановили значення $K_{\text{швидкості}}$ для кожної швидкості подачі агрегату з інструментом в діапазоні від 1 до 10 м/хв (табл. 3).

Здійснивши апроксимацію даних табл. 3, отримали формулу полінома 2-го степеня залежності $K_{\text{швидкості}}$ від швидкості подачі агрегату під час фрезерування замкового гнізда:

$$K_{\text{швидкості}}(V) \approx 1.01154825 - 0.01480609 \cdot V - 0.00108971 \cdot V^2 \quad (8)$$

Поєднання формули (8) з формулою (7) дало можливість розрахувати час фрезерування замкового гнізда на ЧПК верстаті з використанням агрегату. Вхідними даними для розрахунку за такою формулою є геометричні параметри самого гнізда, діаметр фрези, швидкість переміщення агрегату і крок врізання. Математична модель має такий вигляд:

$$T = T_{\Pi} + 0,12 \cdot \frac{(B+L-2D) \cdot \left[\frac{H}{S}\right]}{V(1.01154825 - 0.01480609V - 0.00108971V^2)} + T_B \quad (9)$$

Відхилення між значеннями, отриманими за математичною моделлю (9), і результатами експериментальних досліджень складає менше 4% для швидкостей подачі до 5 м/хв та до 8% – для швидкостей подачі до 10 м/хв. Оскільки відхилення є незначними, то розроблена математична модель для прогнозування затрат часу на виготовлення гнізда під замок є достовірною і придатною для використання у виробничих умовах. Різке збільшення відсотка відхилення на заданій швидкості подачі 10 м/хв пояснюється впливом затрат часу на розгін та гальмування на різних ділянках траєкторії переміщення інструменту. Цей аспект також можна прослідкувати і за наведеними в табл. 2 даними, де чітко виражена різка зміна коефіцієнта швидкості залежно від довжини гнізда. Тому вибір швидкостей переміщення інструменту на верстатах з ЧПК понад 10м/хв на таких коротких відстанях є недоцільним.

Таблиця 3. Значення коефіцієнта швидкості відповідно до швидкості подачі агрегату
Table 3. The value of the speed coefficient according to the feed rate of the unit

Швидкість подачі агрегату, м/хв	Коефіцієнт швидкості
1	0,99248
2	0,97882
3	0,96151
4	0,93738
5	0,91069
6	0,88122
7	0,85024
8	0,81912
9	0,78720
10	0,75611

Дискусія (Discussion).

Аналіз результатів досліджень вказує на зміну виробничого часу залежно від траєкторії переміщення інструменту, що використовується для фрезерування замкового гнізда. Зі зміною інструмента відбувається зміна траєкторії руху, а, отже, призводить до збільшення часу фрезерування гнізда. Отримані результати співпадають з результатами досліджень впливу траєкторії на виробничий час у випадку фрезерування площин заготовок на деревообробному верстаті з ЧПК (Özçelik, Koç, 2021). Тип обраної траєкторії переміщення інструмента та більший діаметр інструмента призводять до скорочення виробничого часу, що пов'язано з коротшими траєкторіями бокових переміщень.

Проте дослідження щодо застосування верстатів з ЧПК у деревообробці та меблевій промисловості, які зосереджені на оптимізації параметрів для досягнення бажаної якості поверхні деревних матеріалів, свідчать, що такі показники, як швидкість подачі та частота обертання шпинделя, мають значний вплив на кінцевий результат. Зокрема, збільшення частоти обертання шпинделя та швидкості подачі зазвичай знижують шорсткість поверхні, тоді як збільшення діаметра інструмента призводить до зростання поверхневої шорсткості (Demir, Çakıroğlu, Aydın, 2022).

Хоча в згаданих дослідженнях формування гнізда під замок виконували без урахування вимог до шорсткості його внутрішньої поверхні, у випадку створення ступінчастого гнізда з вибіркою під лицьову планку (накладку) доцільно використовувати фрезу меншого діаметра. При цьому сам технологічний процес фрезерування необхідно розділяти на етапи чорнової та чистової обробки.

Окрім того, отримані результати корелюються з висновками науковців Bal, Dumanoglu (2019), які досліджували вплив параметрів різання на якість поверхні, енергоспоживання та час

оброблення при фрезеруванні MDF панелей. У своєму дослідженні вони акцентували увагу на визначенні оптимальної швидкості подачі та швидкості обертання ріжучого інструмента для досягнення мінімальної шорсткості поверхні. Водночас було встановлено вплив зазначених технологічних параметрів на час оброблення та зазначено, що найменший час фрезерування було зафіксовано за максимальної швидкості подачі ріжучого інструмента.

Дослідження фрезерування зразків горіха волоського та ясена звичайного в роботі Çakıroğlu et al. (2022) були зосереджені на аналізі впливу швидкості подачі та швидкості обертання ріжучого інструмента на шорсткість і змочувальність поверхні, енерговитрати та час оброблення. Результати нашого дослідження подібні до результатів, отриманих Çakıroğlu et al. (2022) в тому, що мінімальний час оброблення було досягнуто за використання інструмента найбільшого діаметра та найбільшої швидкості подачі.

Висновки (Conclusions).

1. Діаметр інструменту має вплив на траєкторію його переміщення та відповідно на виробничий час при виготовленні гнізда під замок у дверному полотні на верстаті з числовим програмним керуванням.

2. Розроблена математична модель прогнозування часу виготовлення гнізда під замок у дверному полотні придатна до використання у виробничих умовах.

3. Вибір швидкостей переміщення інструмента на верстатах з ЧПК понад 10 м/хв під час виготовлення гнізд під замок незначного розміру в дверному полотні є недоцільним, оскільки на коротких дистанціях затрати часу на розгін та гальмування нівелюють встановлену швидкість.

Конфлікт інтересів (Conflicts of Interest).

Автори заявляють про відсутність у них відомих конкуруючих фінансових інтересів чи особистих зв'язків, які могли б вплинути на результати, представлені у цій статті.

Список літератури (References)

- Ashley, P. N. (2016). Innovative use of CNC technology for the manufacture of furniture in batch size of one. (A dissertation submitted in total fulfillment of the requirements of the Master of Philosophy). *School of Ecosystem and Forest Sciences, Faculty of Science, The University of Melbourne*. Melbourne. <https://hdl.handle.net/11343/118610>
- Bal, B. C., & Dumanoglu, F. (2019). Surface roughness and processing time of a medium density fiberboard cabinet door processed via CNC router, and the energy consumption of the CNC router. *BioResources*, 14(4), 9500–9508. <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9500-9508>
- Boyko, S., Eroshenko, A., & Ignatenko, P. (2018). Preparation for the production of furniture facades using modern CAM systems. *Technical Sciences and Technologies*, 1, 159–167. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2018_1_19
- [Бойко, С., Єрошенко, А., & Ігнатенко, П. (2018). Підготовка виробництва меблевих фасадів із використанням сучасних САМ-систем. *Технічні науки та технології*, 1, 159–167] (in Ukrainian)
- Çakıroğlu, E. O., Demir, A., Aydın, İ., & Büyüksarı, Ü. (2022). Prediction of optimum CNC cutting conditions using artificial neural network models for the best wood surface quality, low energy consumption, and time savings. *BioResources*, 17(2), 2501–2524. <https://doi.org/10.15376/biores.17.2.2501-2524>
- Cakmak, A., Malkocoglu, A., & Ozsahin, S. (2023). Optimization of wood machining parameters using artificial neural network in CNC router. *Materials Science and Technology*, 39(14), 1728–1744. <https://doi.org/10.1080/02670836.2023.2180901>
- Csanády, E., & Magoss, E. (2020). *Mechanics of wood machining* (3rd ed.). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51481-5>
- Czerwińska, K., & Grebski, M. E. (2021). An analysis and improvement of the production process of external doors. *Modern Management Review*, 26(3), 59–67. <https://doi.org/10.7862/rz.2021.mmr.17>
- Czerwińska, K., & Pacana, A. (2019). Analysis of the efficiency of machine use on the production line of interior doors. *Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, 22(2), 2–6. <https://doi.org/10.25961/ent.manag.22.02.01>
- Demir, A., Çakıroğlu, E. O., & Aydın, İ. (2022). Effects of CNC processing parameters on surface quality of wood-based panels used in furniture industry. *Drvna Industrija*, 73(4), 363–371. <https://doi.org/10.5552/drvid.2022.2109>
- German Institute for Standardization. (2020). *DIN 18251:2020-04. Locks–Mortise locks and multipoint locks–Terms, definitions and dimensions*. Berlin, Germany: DIN. <https://doi.org/10.31030/3133998>
- Gisip, J., Lemaster, R., & Saloni, D. (2026). Enhancing tool life through innovative process control in wood-based machining. *Wood Material Science & Engineering*, 21(1), 575–585. <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2439058>
- Gola, A., Świć, A., & Kramar, V. (2011). A multiple-criteria approach to machine tool selection for focused flexibility manufacturing systems. *Management and Production Engineering Review*, 2(4), 21–32. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/235861051_A_MULTIPLE-CRITERIA_APPROACH_TO_MACHINE-TOOL_SELECTION_FOR_FOCUSED_FLEXIBILITY_MANUFACTURING_SYSTEMS
- Jiang, X. B., Wu, Q. H., Jing, F. M., Yang, C. M., & Luo, G. (2014). Wooden door slot cutting system of CNC machine finite element analysis. *Key Engineering Materials*, 579–580, 603–606. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KE M.579-580.603>
- Kalyna, A. A., & Myskiv, Y. M. (2024). Investigation of the Influence of Cutting Length on Feed Rate. In *Forestry education and science: current challenges and development prospects: proceedings of the International Scientific and practical Conference*, 1–5. Lviv, October 23-25. Lviv: Ukrainian National Forestry University. <https://doi.org/10.36930/conf150.5.34> [Калина, А. А., Миськів Є. М. (2024) Дослідження впливу довжини різу на швидкість подачі. *Лісотехнічна освіта і наука: виклики сьогодення та перспективи розвитку: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Львів, 23-25 жовтня 2024 р. Львів: Національний лісотехнічний університет України, 1–5] (in Ukrainian)
- Kwidziński, Z., Bednarz, J., Pędzik, M., Sankiewicz, Ł., Szarowski, P., Knitowski, B., & Rogoziński, T. (2021). Innovative Line for Door Production TechnoPORTA – Technological and Economic Aspects of Application of Wood-Based Materials. *Applied Sciences*, 11(10), 4502. <https://doi.org/10.3390/app11104502>

- Kwidziński, Z., Drewczyński, M., Gołabek, T., Mysza, R., Wilczyński, A., Gębczyk, K., ... Rogoziński, T. (2023). The efficiency of the formatting and milling module of the technological line for door frames production. *Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology*, 121, 72–78. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.8640>
- Lopez de Lacalle, L. N., Fernández-Larrinoa, J., Rodríguez-Ezquerro, A., Fernández-Valdivielso, A., López-Blanco, R., & Azkona-Villaverde, I. (2015). On the cutting of wood for joinery applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(6), 940–952. <https://doi.org/10.1177/0954405414534431>
- Naroei, K. D., & Ramli, R. (2014). New approaches in tool path optimization of CNC machining. *Applied Mechanics and Materials*, 663, 657–661. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.663.657>
- Petrovic, A., Lukic, L., Ivanovic, S., & Pavlovic, A. (2017). Optimisation of tool path for wood machining on CNC machines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(1), 72–87. <https://doi.org/10.1177/0954406216648715>
- Tobias, S. (2015). *Illustrated guide to door hardware: Design, specification, selection*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=RzoxBwAAQBAJ>
- Yaghoubi, S., Rabiei, F., & Seidi, M. (2024). A comprehensive assessment on surface quality of machined wooden products via Box-Behnken design method. *Wood Material Science & Engineering*, 19(4), 896–905. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2290212>
- Özçelik, Ö., & Koç, K. H. (2021). Evaluation of tool path strategies in CNC woodworking machines and a case study. *Wood Industry and Engineering*, 3(2), 1–11. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1436564>

Influence of Tool Diameter and Feed Rate on the Machining Time of a Lock Mortise in a Door Leaf on a CNC Woodworking Machine

Y. Myskiv¹, R. Barabash², A. Kalyna³

The paper presents the results of an experimental study on the influence of cutting tool diameter and feed rate on the time required to machine a lock mortise in a door leaf. The study also considers the influence of toolpath geometry, as well as the mortise length and depth. Particular attention is focused on investigating the nonlinear effect of the cutting tool feed rate on lock mortise milling time caused by the presence of acceleration and deceleration sections along the toolpath. A graphical representation of the relationship covering a feed rate range from 1 to 10 m/min is presented. The obtained experimental results were approximated using a second-order polynomial. A mathematical model was developed for calculating the machining time

time required for lock mortise production, taking into account the geometrical parameters of the mortise, cutting tool diameter, and tool feed rate.

As the feed rate increases, the machining time required to produce the lock mortise decreases nonlinearly. The value of the feed rate coefficient varies from 0.992 at a feed rate of 1 m/min to 0.756 at a feed rate of 10 m/min. This is explained by the fact that increasing the feed rate of the cutting tool increases the length of the toolpath sections where acceleration and deceleration occur.

A significant influence of the cutting tool diameter on the feed rate coefficient was observed. In the case where the tool diameter matches the width of the mortise, the feed rate coefficient re-

¹ Yevstakhii Myskiv – PhD in Technical Sciences, Senior teacher at the Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: myskivs@i.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1762-4728>

² Ruslan Barabash – PhD Student at the Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: barabash.r@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5533-6889>

³ Artem Kalyna – PhD Student at the Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: kalyna.a@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8191-9800>

ches its highest values. When the tool diameter is smaller than the mortise width, the coefficient values decrease but exhibit little dependence on the specific tool diameter used. This confirms the feasibility of using a cutting tool whose diameter is equal to the width of the lock mortise, provided that the CNC equipment is technologically capable of applying such a tool diameter.

In addition, the influence of mortise length on the feed rate coefficient was established. The coefficient increases with increasing mortise length. This is attributed to the relative increase in the length of toolpath sections at the specified feed rate compared to the length of the acceleration and deceleration sections. The magnitude of this effect is insignificant at low feed rates but increases considerably as the feed rate rises.

The influence of mortise depth on the feed rate coefficient is the smallest and does not allow clear patterns of variation to be identified due to its minor magnitude. This is explained by the fact that increasing mortise depth increases the number of repeated toolpath segments resembling spiral turns. However, the ratio between the length and number of constant-

feed toolpath sections and acceleration/deceleration sections remains almost unchanged.

The scientific novelty of the study lies in the development of a mathematical model for predicting the machining time required to produce a lock mortise in a door leaf, taking into account the feed rate coefficient, the values of which were obtained experimentally and approximated by a second-order polynomial.

The practical significance of the study consists in the potential application of the developed mathematical model for planning the technological process of door leaf manufacturing and for analyzing the influence of the applied cutting tool, feed rate, as well as mortise depth and length on milling time. The obtained results may be applied under industrial production conditions for predicting and controlling the machining time required for producing lock mortises on CNC woodworking machines.

Key words: Resource efficiency; manufacturing process; door leaf; mortise milling; lock mortise; tool diameter; machining time; feed rate coefficient; process optimization; interior doors