УДК 621.922.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.25

С. В. ПОПОВ
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-2381-152X

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ШЛІФУВАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ МЕТОДОМ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Стрічкове шліфування є ефективним методом обробки, а також відновлення інструментів та деталей машин. Воно забезпечує високу якість обробленої поверхні та високу продуктивність. Завдяки гнучкості абразивної стрічки зменшуються термічні пошкодження, зберігається твердість та підвищується довговічність виробів, що зазнали обробки. У роботі зосереджено увагу на вдосконаленні процесу відновлення різального інструменту стригальної машинки методом стрічкового шліфування. Висвітлено слабкі сторони традиційних методів заточування та акцентовано переваги абразивного стрічкового шліфування. Для оптимізації процесу заточування було проведено повний факторний експеримент із трьома змінними: швидкість руху стрічки; час заточування; зусилля притискання. Випробування зазнали як рухомий, так і нерухомий ножі. Шорсткість поверхні вимірювали профілометром, а мікротвердість – твердоміром. Для моделювання впливу технологічних параметрів на шорсткість поверхні були отримані регресійні рівняння, а для перевірки адекватності моделей застосовано статистичні методи (t-критерій Стьюдента, G-критерій Кохрена, F-критерій Фішера). Експериментальні результати засвідчили, що оптимальні параметри заточування становлять: швидкість руху стрічки – 1,7 м/с; зусилля притискання – 18 Н; час заточування – 19 с для нерухомого і 12 с для рухомого ножів. За таких умов забезпечується шорсткість поверхні в межах 9-го класу чистоти (Ra = 0,16…0,32 мкм), зберігається твердість інструменту на рівні HRA 84 та відсутні ознаки термічних пошкоджень. Загалом, дослідження пропонує науково обґрунтовану методику встановлення режимів заточування, що продовжує термін служби інструменту та підвищує ефективність роботи стригальної машинки.

Ключові слова: *стрічкове шліфування, шорсткість поверхні, режимні параметри, мікротвердість, абразивна стрічка, багатофакторний експеримент, коефіцієнти регресії.*

S. V. POPOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-2381-152X

DETERMINATION OF THE OPTIMAL GRINDING MODES FOR CUTTING TOOLS USING THE PLANNING METHOD OF EXPERIMENT

Belt grinding is an effective method of machining as well as restoring tools and machine parts. It ensures high surface quality and productivity. Due to the flexibility of the abrasive belt, thermal damage is reduced, hardness is preserved, durability of the processed components is increased. The work focuses on improving the process of restoring cutting tools in shearing machines through belt grinding. The study highlights the shortcomings of traditional sharpening methods and emphasizes the advantages of abrasive belt grinding. To optimize sharpening, a full factorial experiment with three variables was carried out: belt speed, sharpening time, and pressing force. Both movable and stationary knives were tested under controlled conditions, and surface roughness was measured using a profilometer, microhardness was measured using a hardness tester. Regression equations were derived to model the influence of technological parameters on surface roughness, and statistical methods (Student's t-test, Cochran's G-test, Fisher's F-test) were applied to validate the models. Experimental results showed that the optimal sharpening parameters are belt speed of 1.7 m/s, pressing force of 18 N, sharpening time of 19 s for stationary and 12 s for movable knives. These conditions ensure surface roughness within the 9th grade of finish (Ra = 0.16…0.32 µm), preserve tool hardness at HRA 84, and prevent thermal damage. Overall, the research provides a scientifically grounded methodology for setting sharpening regimes that extend tool life and improve shearing machine performance.

Key words: *belt grinding, surface roughness, process parameters, microhardness, abrasive belt, multifactor experiment, regression coefficients.*

© Попов С. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми

Якість роботи стригальних машинок значною мірою залежить від стану їх різальної пари. У процесі експлуатації ножі піддаються інтенсивному зношуванню, що призводить до зниження гостроти кромок, підвищення зусиль різання, перегріву та зменшення терміну служби обладнання. Традиційні методи заточування не завжди забезпечують бажаний рівень точності, чистоти обробки поверхонь, що, у свою чергу, впливає на якість технологічного процесу та комфорт роботи оператора [1–3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Стрічкове шліфування є одним із найбільш перспективних методів відновлення працездатності різальних пар, оскільки дозволяє отримати стабільну якість поверхні за відносно короткий час і з мінімальними витратами. Недостатнє обґрунтування оптимальних режимів призводить до появи дефектів типу припалів, надмірного зношування абразиву та зниження стійкості різальної пари.

Вивченню стрічкового шліфування присвячено чимала кількість наукових робіт, зокрема у роботі [4] відзначається відсутність певної теорії обробки та наявної методики. Саме це обмежує використання стрічкового шліфування як методу обробки робочих поверхонь інструментів. На підставі теоретичних розрахунків та серії експериментів були отримані математичні моделі. Вони встановлюють зв'язок між шорсткістю обробленої поверхні та режимними параметрами обробки. Результати підтверджують можливість підвищення ефективності та якості шліфування за рахунок оптимізації режимів роботи.

Вплив технологічних параметрів стрічкового шліфування на якість поверхні загартованої сталі розглянуто у роботі [5]. Вивчено фактори впливу часу обробки, розміру абразивних зерен, швидкості обертання заготовки та змащування. За результатами роботи встановлено, що найкраще значення шорсткості можливо досягти при часі обробки у 60 с, обертах 900 об/хв та використанні абразивних матеріалів 20 мкм. Застосування змащення позитивно впливає на якість обробленої поверхні, але воно не є домінуючим фактором. Дослідження доводить перспективність стрічкового шліфування як ефективного та економічного способу фінішної обробки сталей.

Методика визначення радіуса вершин абразивних зерен на основі стандартних маркувань шліфувальних кругів (ISO та ГОСТ) запропонована у [6]. Окрім того, розробили формули для розрахунку об'ємної концентрації зерен у колі. Результати моделювання було перевірено експериментально при шліфуванні сталей D3, A295M та SAE 420 абразивними кругами з Al_2O_3 та CBN. Порівняння показало, що відхилення розрахованих значень від експериментальних становить у середньому 15,11 % для круга Al_2O_3 і 24,29 % для CBN, що підтверджує достовірність запропонованої методики. Робота дає вагомий внесок у підвищення точності прогнозування якості поверхні та зменшення часу налагодження шліфувальних процесів.

Підхід машинного навчання застосовано для встановлення залежностей між технологічними параметрами обробки та кінцевою якістю поверхні [7]. Було проведено серію експериментів для збору даних і перевірки точності побудованих моделей. Можливе точне прогнозування шорсткості Ra, мкм. Запропонована методика може бути використана під час визначення оптимальних режимів шліфування. Це матиме позитивний вплив на продуктивність, а також буде зменшено витрати на обробку.

Авторами роботи [8] проведено серію експериментальних досліджень, за результатами яких спрогнозовано значення кінцевої шорсткості поверхонь, оброблених шліфуванням. Проаналізовано вплив швидкості інструменту, глибини різання та подачі на величину шорсткості за результатами обробки. Було запропоновано матмоделі для визначення шорсткості Ra, мкм, на підставі проведеного натурного експерименту. Отримані результати знаходяться у межах допустимого значення похибки, тому запропонований матеріал є доволі актуальний для оптимізації режимів шліфування, а також підвищення ефективності механічної обробки.

Роботизованому процесу стрічкового шліфування присвячено дослідження [9]. Була розроблена топографічна модель поверхні. Вона враховувала деформації еластичного контактного колеса. Результати підтверджені на експериментальному рівні. Запропонована методика надає можливість спрогнозувати значення шорсткості із похибкою, що не перевищує 12 %. Робота має практичне значення у різних галузях промисловості (авіаційна, енергетична, автомобільна). Слід відмітити також забезпечення точності та якості обробки.

Отже, на підставі аналізу літературних джерел [4–9] слід відмітити, що пошук оптимальних режимних параметрів є доволі важливим. Саме вони сприятимуть забезпеченню належного рівня якості та тривалої роботоздатності оброблених поверхонь. На підставі планування повного факторного експерименту можливо забезпечити комплексний підхід впливу режимних параметрів на якість кінцевого продукту за умови наукового обґрунтування обробки стрічковим шліфуванням.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у визначенні оптимальних режимних параметрів процесу стрічкового шліфування різальної пари стригальної машинки, що забезпечують необхідну шорсткість поверхні, збереження твердості робочих кромок і підвищення довговічності інструменту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Під час заточування ріжучих пар стрічковим шліфуванням параметрами, що мають вплив на шорсткість обробленої поверхні, є: зернистість абразивної стрічки; швидкість руху стрічки; зусилля притискання рухомого і нерухомого ножів до стрічки; тривалість контакту деталі зі стрічкою; ступінь зношеності стрічки. Проведення експерименту відбувалося із визначенням швидкості руху стрічки, зусилля притискання ножів до стрічки, часу їх контакту зі стрічкою, які забезпечать шорсткість у межах 9 класу. Для встановлення ступеня впливу керованих режимних параметрів процесу шліфування на якість заточування та визначення їх оптимальних значень, скористаємося методикою проведення багатофакторного експерименту [10].

Залежність параметра шорсткості обробленої поверхні від параметрів (якими можна керувати) процесу шліфування представимо у вигляді рівняння лінійної регресії. Для 3-факторного експерименту воно має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

де $y = \lg \mathrm{Ra}$ – логарифмічний вираз параметру шорсткості Ra (відгук моделі); x_1, x_2, x_3 – змінні фактори у закодованому вигляді, що відповідають швидкості стрічки V, часу заточування T та зусиллю притискання P_y відповідно; b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти регресії при змінних факторах, що є оцінками їх значущості; b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123} – коефіцієнти регресії, що враховують значущість взаємного впливу змінних факторів безпосередньо на процес шліфування.

Кодування факторів x_1, x_2, x_3 у рівнянні регресії (1) здійснюється за наступними виразами:

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= \frac{2\left(\lg V - \lg V_{\max}\right)}{\lg V_{\max} - \lg V_{\min}} + 1; \\ x_2 &= \frac{2\left(\lg T - \lg T_{\max}\right)}{\lg T_{\max} - \lg T_{\min}} + 1; \\ x_3 &= \frac{2\left(\lg P_y - \lg P_{y\max}\right)}{\lg P_{y\max} - \lg P_{y\min}} + 1. \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Розрахунок коефіцієнтів регресії b_0, b_1, b_2, b_3 у рівнянні (1) відбувався з урахуванням знаку (±) при змінних факторах:

$$\left.\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overline{Y_l}; \\ b_j &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_{ji}\overline{Y_l}, \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

де $\overline{Y_l}$ – середнє значення логарифму шорсткості (три паралельні досліди).

Оцінка вагомості коефіцієнтів регресії здійснюється за допомогою t-критерію Стьюдента. Коефіцієнт регресії bj буде статично значимий при умові:

$$b_j \geq \pm t_{T(p,f_{\bar{y}})} S_{b_j}, \quad (4)$$

де $t_{T(p,f_{\bar{y}})}$ – табличне значення критерію Стьюдента; S_{b_j} – середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії.

При рівні довірчої ймовірності p = 0,95 і числі ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{\bar{y}} = N(k-1) = 8(3-1) = 16$ табличне значення критерію Стьюдента становить $t_{T(0,95;\,16)} = 2{,}12$ [10].

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії визначається

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S^2_{\overline{y_l}}}{N}}, \quad (5)$$

де $S^2_{\overline{y_l}}$ – оцінка середнього значення дисперсії відтворюваності:

$$S^2_{\overline{y_l}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}S_i^2, \quad (6)$$

де S_i^2 – дисперсія відтворюваності паралельних дослідів.

Рівні варіювання режимних параметрів стрічкового шліфування подано в таблиці 1.

Виходячи з норм часу заточування рухомого і нерухомого ножів (15...20 і 25...40 с відповідно) приймемо крайні значення часу заточування від 10 до 16 с для рухомого ножа і від 15 до 25 с для нерухомого ножа, з метою скоротити трудомісткість заточування. Прийняті крайні значення швидкості стрічки 1...2 м/с. Рівні варіювання зусилля притискання ножів до поверхні стрічки (виходячи із забезпечення мінімально можливого навантаження на руку слюсаря-заточувальника) – 10...20 Н.

Таблиця 1

Рівні варіювання

Рівень	Швидкість стрічки		Час заточування			Сила притискання	
			T, с		x_2	P_y, Н	x_3
	V, м/с	x_1	ніж рухомий	ніж нерухомий			
Основний	1,5	0	13	20	0	15	0
Верхній	2,0	+1	16	25	+1	20	+1
Нижній	1,0	–1	10	15	–1	10	–1

У ході проведення експериментів нами враховувалася різниця в площі робочих поверхонь ножів. Досліди для рухомого та нерухомого ножів проводилися окремо, але на однакових значеннях параметрів швидкості стрічки і зусилля притискання. Це робилося з метою пошуку значень режимних параметрів, придатних для них двох, що має в майбутньому полегшити експлуатацію верстату.

Згідно із методикою проведення повного факторного експерименту з трьома змінними на двох рівнях, було проведено вісім незалежних дослідів ($N = 2^3$). Кожен з дослідів відповідав граничній точці експерименту.

У таблиці 2 наведена матриця плану проведення експерименту. Рядки відповідають проведеним дослідам, а стовпці X_j – параметрам незалежного і взаємного впливу. Знаку (+) відповідає максимальне значення параметра в експерименті, а знаку (–) мінімальне значення.

Для достовірності по кожному незалежному досліду проводилося не менше 3 паралельних дослідів із визначенням кожен раз параметра шорсткості, обчисленням його середнього арифметичного значення. При побудові рівняння регресії в логарифмічних координатах необхідно представляти отримані експериментально значення шорсткості R_a як логарифм їх значень із символом y_{ik}, а середнє значення логарифмів як $\overline{y_l}$.

Таблиця 2

Матриця плану експерименту $N = 2^3$

№ досліду, N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	–	+	+	–	–	+	–
3	+	+	–	+	–	+	–	–
4	+	–	–	+	+	–	–	+
5	+	+	+	–	+	–	–	–
6	+	–	+	–	–	+	–	+
7	+	+	–	–	–	–	+	+
8	+	–	–	–	+	+	+	–

Оцінка відтворюваності паралельних дослідів у логарифмічному виразі здійснювалася за G-критерієм Кохрена. Для прийнятих в експерименті умов дослідів: $p = 0{,}95$; $N = 8$; $f_i = k - 1 = 3 - 1 = 2$. Табличне значення критерію Кохрена за [10] становить: $G_T(0{,}95; 8; 2) = 0{,}516$. Також було визначено розрахункове значення G_p- критерію Кохрена визначається.

Для визначення шорсткості оброблених робочих поверхонь ножів використовувався профілограф-профілометр. Виміри проводилися за поверхнями ріжучих пар до і після їх заточування на стрічковому точильному верстаті.

Для вимірювання відхилень мікротвердості робочих поверхонь ріжучих пар від номінальних значень, характерних для сталі У9, використовувався твердомір. Вимірювання проводилися до і після заточування, за шкалою HRA. Твердість замірялася біля основи і на кінцях зубців. Основною характеристикою абразивних стрічок є їх зернистість. Цей параметр більшою мірою визначає чистоту обробленої поверхні, оскільки саме від розміру основної фракції зерен у зв'язці стрічки залежить висота мікронерівностей, що залишаються ними на поверхні деталі у процесі шліфування. Встановлено, що найбільша стійкість різальних пар досягається при їх заточуванні із використанням абразиву P240 (ISO 6344/FEPA) із середнім розміром абразивних частинок 60 мкм.

Під час знаходження оптимальних значень режиму заточування ріжучих пар стрічковим шліфуванням необхідно визначитися зі значенням вихідного показника, що буде відповідати необхідним експлуатаційним характеристикам процесу, що досліджується. Значення шорсткості прийнято 0,2 мкм, що є кращим у ряді значень за 9 класом. Досягнення цього значення буде вважатися необхідним для призначення режиму шліфування, якому відповідають цілі експерименту. Результати виміру шорсткості робочих поверхонь нерухомого ножа, отримані в ході експерименту, представлені у таблиці 3. Досліди проводилися згідно зі складеним планом експерименту. За трьома паралельними дослідами знайдено середнє значення шорсткості $\overline{Ra_l}$.

Спираючись на результати проведеного експерименту, розрахуємо значення коефіцієнтів регресії для наступної підстановки їх у рівняння (1). Розрахунок коефіцієнтів проводився за формулою (2).

Середнє значення дисперсії відтворюваності становить:

$$S^2_{\overline{y_l}} = \frac{1}{8}\left(33,51 + 26,14 + 11,08 + 8,06 + 15,56 + 6,48 + 9,01 + 22,23\right) \cdot 10^{-4} = 16,51 \cdot 10^{-4}.$$

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{16,51 \cdot 10^{-4}}{8}} = 1,1436 \cdot 10^{-2}.$$

Таблиця 3

Результати експерименту та їх обробка (нерухомий ніж)

№ досліду	$\overline{Ra_l}$	$\overline{y_l}$	$\widehat{y_l}$	$(\overline{y_l} - \widehat{y_l})^2_i \cdot 10^{-4}$	$S^2_i \cdot 10^{-4}$
1	0,15	–0,8239	–0,8212	0,0729	33,51
2	0,48	–0,3187	–0,319	0,0009	26,14
3	0,35	–0,4559	–0,4534	0,0625	11,08
4	0,62	–0,2076	–0,208	0,0016	8,06
5	0,29	–0,5376	–0,538	0,0016	15,56
6	0,40	–0,3979	–0,3955	0,0576	6,48
7	0,51	–0,2924	–0,2918	0,0036	9,01
8	0,70	–0,1549	–0,155	0,0001	22,23

Статистично значущі коефіцієнти регресії (таблиця 4) повинні задовольняти умові $b_j \geq \pm 2,12 \cdot 1,1436 \cdot 10^{-2} = \pm 0,0304$.

Таблиця 4

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії

b_0	b_1	b_2	b_3	b_1b_2	b_1b_3	b_2b_3	$b_1b_2b_3$
0,3987	–0,1287	–0,121	–0,053	0,0325	–0,0595	0,0317	–0,0013

Як ми бачимо, статистично значущими є усі коефіцієнти, окрім $b_1b_2b_3$. Враховуючи оцінку вагомості коефіцієнтів рівняння регресії (1) набуде вигляду:

$$y = 0,3987 - 0,1287x_1 - 0,121x_2 - 0,053x_3 + 0,0325x_1x_2 - 0,0595x_1x_3 + 0,0317x_2x_3. \quad (7)$$

Перевірка адекватності отриманої залежності (7) експериментально отриманим значенням шорсткості поверхні при стрічковому шліфуванні здійснювалася за F-критерієм Фішера. Його розрахункове значення повинно бути більше (дорівнювати) табличного значення при прийнятих умовах експерименту. При узятих в експерименті відомих $p = 0,95$, $f_{\overline{y}} = 16$ і новій умові – числі ступенів вільності дисперсії адекватності, визначається, як $f_{ад} = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1) = 4$, табличне значення критерію Фішера склало: $F(0,95; 4; 16) = 3,01$ [10].

Розрахункове значення F-критерію Фішера становить 328,9. Воно більше за табличне значення. Це свідчить про адекватність моделі і слугує підставою для її прийняття у якості робочої саме для опису залежності параметра шорсткості у факторному просторі, що досліджувався.

Підставляючи у вираз (2) для x_1, x_2 та x_3 максимальне і мінімальне значення відповідних їм параметрів V, T, і P_y, отримаємо вирази в декодованому вигляді. Після підстановки їх у (7) і проведення обчислень, маємо вираз рівняння регресії у декодованому вигляді для нерухомого ножа:

$$Ra_г = 1,12 - 0,02 \cdot V - 0,0365 \cdot T - 0,003 \cdot P_y + 0,001 \cdot V \cdot T - 0,015 \cdot V \cdot P_y + 0,0009 \cdot T \cdot P_y. \quad (8)$$

При підстановці в рівняння (8) значень факторів за основним рівнем варіювання $V = 1,5$ м/с, $T = 20$ с і $P_y = 15$ Н маємо розрахункове значення шорсткості поверхні – 0,277 мкм. Експериментальне значення при цих значеннях факторів склало 0,29 мкм, що лежить у межах 5 % похибки експерименту. Аналогічно проведено визначення рівняння регресії для рухомого ножа, а також серія експериментів (таблиця 5).

$$Ra_н = 2,036 - 0,3558 \cdot V - 0,0971 \cdot T - 0,0385 \cdot P_y + 0,015 \cdot V \cdot T - 0,0065 \cdot V \cdot P_y + 0,00258 \cdot T \cdot P_y. \quad (9)$$

За виразами (8) та (9) було визначено оптимальні значення режимів стрічкового шліфування різальної пари на верстаті: швидкість стрічки 1,7 м/с; сила притискання до стрічки 18 Н; час заточування нерухомого ножа 19 с; час заточування рухомого ножа 12 с.

Таблиця 5

Результати експерименту та їх обробка (рухомий ніж)

№ досліду	$\overline{Ra_l}$	$\overline{y_l}$	$\widehat{y_l}$	$(\overline{y_l}-\widehat{y_l})_i^2 \cdot 10^{-4}$	$S_i^2 \cdot 10^{-4}$
1	2	3	4	5	6
1	0,17	–0,7269	–0,7212	0,0623	35,48
2	0,45	–0,2878	–0,2738	0,0009	23,11
3	0,30	–0,4019	–0,4022	0,0625	9,88
4	0,58	–0,2371	–0,2386	0,0016	9,76
5	0,32	–0,4879	–0,4843	0,0016	14,31
6	0,44	–0,3979	–0,3955	0,0576	8,68
7	0,51	–0,2924	–0,2918	0,0036	10,27
8	0,82	–0,1451	–0,1435	0,0001	25,44

Вимірювання мікротвердості робочих поверхонь ножів засвідчило, що за визначених оптимальних режимах обробки вона залишається незмінною. Припали поверхонь, термічне відпускання внаслідок дії високих температур обробки у зоні контакту деталі зі стрічкою відсутні.

Висновки

Запропоновано методику реалізації трифакторного експерименту із визначення функціональної залежності шорсткості оброблених поверхонь ріжучої пари від технологічних параметрів впливу. Встановлено значення параметрів заточування ріжучих пар на верстаті, що відповідають оптимальному режиму роботи (див. вище). Під оптимальним розуміється режим роботи, що забезпечує: значення шорсткості R<sub>a<\sub> робочих поверхонь ножів у межах 9 класу чистоти обробки (0,16...0,32 мкм); тривалість заточування, що не перевищує нормованого значення 20 с рухомого для ножа і 40 с для нерухомого ножа; збереження твердості робочих поверхонь ріжучої пари на рівні HRA 84, як показника відсутності припалів.

Список використаної літератури

1. Фролов Є. А., Кравченко С. І., Попов С. В., Гнітько С. М. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія. Полтава: НУПП, 2019. 204 с.

2. Коробко Б. О., Фролов Є. А., Попов С. В., Ясько С. Г. Прогресивні технології у машинобудуванні. Навчальний посібник для студентів механічних спеціальностей закладів вищої освіти. Полтава: НУПП, 2020. 168 с.

3. Попов С.В. Дослідження точності оброблення циліндра різцем із твердого сплаву. Науковий вісник. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, том 1. С. 105–113. URL: https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-12 (дата звернення 24.08.2025).

4. Скоркін А. О. Дослідження процесу стрічкового шліфування на еластичній основі. Машинобудування. 2016. № 17. С. 87–93.

5. Hamdi, A., Aliouane, T., Bouzid, D. Technological parameters of belt grinding process of hard steel. Mechanics and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 21, No. 4. P. 843–853.

6. Tran Thi V. N., Nguyen Lam K., Nguyen Van C. Research on calculation of grinding surface roughness. EUREKA: Physics and Engineering. 2022. No. 1. P. 85–92. URL: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.001832 (дата звернення 24.08.2025).

7. Khare S. K., Agarwal S. Predictive modeling of surface roughness in grinding. Procedia CIRP. 2015. Vol. 31. P. 375–380. URL: https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.061 (дата звернення 24.08.2025).

8. Trung D. D., Son N. H. An experimental study on prediction of surface roughness in grinding. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 47–58.

9. Liu M., Gong Y., Sun J., Zhao Y., Sun Y. Experimental and numerical study on surface generated mechanism of robotic belt grinding process considering the dynamic deformation of elastic contact wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119, No. 1–2. P. 267–284. URL: https://doi.org/10.1007/s00170-022-09067-6 (дата звернення 24.08.2025).

10. Жученко А. І., Ладієва Л. Р., Піргач М. С., Жураковський Я. Ю. Математичне моделювання процесів і систем: Навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 351 с.

References

1. Frolov, Ye. A., Kravchenko, S. I., Popov, S. V., & Hnitko, S. M. (2019). Technological support of product quality in mechanical engineering. Poltava: NUPP [in Ukrainian].

2. Korobko, B. O., Frolov, Ye. A., Popov, S. V., & Yasko, S. H. (2020). Progressive technologies in mechanical engineering. Poltava: NUPP [in Ukrainian].

3. Popov, S. V. (2025). Study of the accuracy of cylinder machining with a carbide tool. Naukovyi visnyk, 15(1), 105–113 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-12

4. Skorkin, A. O. (2016). Study of the belt grinding process on an elastic base. Mashynobuduvannia, 17, 87–93 [in Ukrainian].

5. Hamdi, A., Aliouane, T., & Bouzid, D. (2017). Technological parameters of belt grinding process of hard steel. Mechanics and Mechanical Engineering, 21(4), 843–853.

6. Tran Thi, V. N., Nguyen Lam, K., & Nguyen Van, C. (2022). Research on calculation of grinding surface roughness. EUREKA: Physics and Engineering, 1, 85–92. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.001832

7. Khare, S. K., & Agarwal, S. (2015). Predictive modeling of surface roughness in grinding. Procedia CIRP, 31, 375–380. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.061

8. Trung, D. D., Son, N. H. (2020). An experimental study on prediction of surface roughness in grinding. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 10 (1), 47–58.

9. Liu, M., Gong, Y., Sun, J., Zhao, Y., & Sun, Y. (2022). Experimental and numerical study on surface generated mechanism of robotic belt grinding process considering the dynamic deformation of elastic contact wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119(1–2), 267–284. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09067-6

10. Zhuchenko, A. I., Ladiieva, L. R., Pirhach, M. S., & Zhurakovskyi, Ya. Yu. (2021). Mathematical modeling of processes and systems: Textbook. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025