

УДК 685.34.05

Д.А. Макатьора, асистент

І.В. Панасюк, д-р техн. наук

Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПОГОННОГО ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ МОНОЛІТНОЇ ГУМИ НОЖЕМ З ОДНОСТОРОННЬОЮ ЗАТОЧКОЮ

Д.А. Макатёра, асистент

И.В. Панасюк, д-р техн. наук

Киевский национальный университет технологий и дизайна, г. Киев, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГОННОГО УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ МОНОЛИТНОЙ РЕЗИНЫ НОЖОМ С ОДНОСТОРОННЕЙ ЗАТОЧКОЙ

Dmytro Makatora, assistant

Ihor Panasyuk, Doctor of Technical Sciences

Kyiv National University of Technological and Design, Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF LINEAR FORCE OF MONOLITHIC RUBBER CUTTING BY THE KNIFE WITH ONE-SIDED GRINDING

Метою цього дослідження є розроблення більш простого та ефективного методу аналізу впливу величини зазору між валиками і величиною відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа на погонне зусилля різання монолітної гуми за допомогою використання рівнянь регресії. Дослідження проведені на прикладі експериментальної установки машини для повздовжнього різання при використанні ножа з односторонньою заточкою. Одержані рівняння регресії описують сумарну величину втрат при поздовжньому різанні матеріалу та величину втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа з односторонньою заточкою.

***Ключові слова:** погонне зусилля, сумарна величина втрат, втрати на тертя матеріалу, валики, кромка леза ножа.*

Целью данного исследования является разработка более простого и эффективного метода анализа влияния величины зазора между валиками и величиной расстояния от вертикальной оси вращения валиков до кромки лезвия ножа на погонное усилие резания монолитной резины путем использования уравнений регрессии. Исследования проведены на примере экспериментальной установки машины для продольного резания при использовании ножа с односторонней заточкой. Полученные уравнения регрессии описывают суммарную величину потерь при продольном резании материала и величину потерь на трение материала о грани неподвижного ножа с односторонней заточкой.

Ключевые слова: погонное усилие, суммарная величина потерь, потери на трение материала, валики, кромка лезвия ножа.

The purpose of this study is to develop a simple and effective evaluation method of the impact the gap between the rollers and the value of the distance from the vertical axis of rollers rotation to the edge of the knife blade have on linear force of monolithic rubber cutting by using regression equations. The research has been conducted by the example of the experimental setup of the cutting machine for longitudinal using a knife with one-sided grinding. The received results of regression equation describe both the total value of loss during the longitudinal cut of the material and the value of loss due to material friction on the brink of a motionless knife with one-sided grinding.

Key words: linear force, the total value of losses, the loss due to material friction, rollers, knife blade edge.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку машинобудування, коли увага все більше приділяється підвищенню якості оброблення деталі і зниженню енергетичних витрат, питання дослідження взаємодії валкового механізму леза ножа з матеріалом деталі при процесі поздовжнього різання займають першочергове значення [1]. При цьому особливої уваги заслуговують питання визначення погонного зусилля різання монолітної гуми під час використання ножа з односторонньою та двосторонньою заточками, а також порівняння сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу під час використання ножів різних геометричних форм. Однак вирішення цієї проблеми є складним. Доцільніше поставлене завдання вирішувати з використанням обчислювальної техніки, застосовуючи експериментальний шлях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Порівняння ножів різної геометричної форми, яке було проведено в роботі [2], показало, що використання леза ножа з односторонньою заточкою дозволяє знизити силу опору просування розділених деталей у порівнянні з двостороннім заточуванням, що, у свою чергу, знизить енергетичні витрати на процес поздовжнього різання при двітні і вирівнюванні матеріалу. Автори робіт [3–6] дослідили взаємодію валкового механізму і леза ножа з двосторонньою заточкою та в роботі [3] визначили погонне зусилля монолітної гуми під час використання ножа з двосторонньою заточкою.

Виділення не вирішеної раніше частини загальної проблеми. Актуальним питанням залишається визначення погонного зусилля різання монолітної гуми під час використання ножа з односторонньою заточкою та порівняння сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу під час використання ножів різних геометричних форм.

Мета статті. Головною метою роботи є експериментальне визначення сумарних величин втрат та величини втрат на тертя матеріалу, розрахування погонного зусилля різання монолітної гуми ножом з односторонньою заточкою, а також порівняння сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу під час використання ножів різних геометричних форм.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження як завершальна стадія проектування машин для поздовжнього різання проводяться для визначення сумарної величини витрат на оброблення матеріалу та величини витрат на тертя з метою визначення погонного зусилля різання монолітної гуми під час використання ножа з односторонньою заточкою.

Для визначення погонного зусилля різання був проведений двофакторний експеримент для моделі дослідження:

$$y = F(x_1, x_2),$$

де y – критерій оптимізації, що визначає q_p ;

x_1 і x_2 – керовані параметри (фактори), що характеризують відповідно величину зазору між валиками h і величину відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа a .

Під час визначення q_p , як зазначалося, необхідно провести двократне оброблення деталі, при якій у ході її розрізання визначається сумарна величина витрат на оброблення (P), а потім після розрізання матеріал складають разом, пропускають площиною з'єднання через ніж та визначають величину витрат на тертя (F). Таким чином, лише різниця цих значень, віднесена до величини ширини деталі (B), дає змогу визначити величину погонного зусилля різання монолітної гуми [7]:

$$q_p = \frac{P - F}{B}. \quad (1)$$

Планування експерименту проводилося з використанням ротатабельного плану Бокса для двофакторного експерименту ($k_{1,2} = 2$), який рекомендується при $k_{1,2} \leq 5$ [8].

Загальна кількість дослідів визначається за формулою [8]:

$$N_{1,2} = 2^2 + 2 \cdot 2 + 5 = 13.$$

Кодування, іменування значення факторів та інтервали їх варіювання наведені в табл. 1, значення яких визначалися за допомогою співвідношень:

$$x_1 = \frac{x_j - 4,35}{1}; \quad x_2 = \frac{x_j - 5}{0,5}. \quad (2)$$

Таблиця 1

Таблиця рівнів та інтервалів варіювання діючих факторів, які підлягають дослідженню

Фактори	Рівні варіювання					Інтервал варіювання фактора
	-1,414	-1	0	+1	+1,414	
h – відстань між транспортуючими валиками, мм (x_1)	2,95	3,35	4,35	5,35	5,75	1
a – відстань між вертикальною віссю обертання транспортуючих валиків і кромкою леза ножа, мм (x_2)	4,3	4,5	5	5,5	5,7	0,5

Проведемо оброблення даних експерименту з визначення сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу. Матриця планування двофакторного експерименту представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця планування двофакторного експерименту визначення сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу

Номер досліді	Матриця планування		Робоча матриця			Дані до розрахунку	
	2	3	4	5	6	7	8
	x_1	x_2	h	a	y_u	y_u	$(y_u - y_u)^2$
1	1	1	5,35	5,5	572	571,28	0,5212
2	-1	1	3,35	5,5	748	746,89	1,2343
3	1	-1	5,35	4,5	824	824,48	0,2314
4	-1	-1	3,35	4,5	856	856,09	0,0085
5	-1,414	0	2,95	5	830	827,94	4,2522
6	1,414	0	5,75	5	684	681,43	6,5948
7	0	-1,414	4,35	4,3	876	872,80	10,2304
8	0	1,414	4,35	5,7	618	616,58	2,0151

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	
9	0	0	4,35	5	756	759,38	11,4358	
10	0	0	4,35	5	762	759,38	6,8556	
11	0	0	4,35	5	758	759,38	1,9090	
12	0	0	4,35	5	758	759,38	1,9090	
13	0	0	4,35	5	762	759,38	6,8556	
					$\sum_{1}^{13} = 9804$	$\sum_{1}^{13} (y_u - \bar{y}_u)^2 = 54,05$		

Під час визначення числа вимірів для кожного дослідів проводилося п'ять повторних вимірювань на нульовому рівні (досліди 9–13) і визначалося наближене значення середньоквадратичної похибки рівняння (1.10) [8]: $S_p = 1,118$.

Розрахункове значення критерію Стюдента в цьому випадку: $t_{розр(P)} = 4,0001$.

Порівняння табличного значення критерію Стюдента для $\alpha_B = 0,95$ і $n_1 = 5$ [8] та розрахункового значення показало, що виконується умова: $t_{розр(P)} \geq t_{табл}$.

Отже, число вимірювань $n_1 = 5$ для кожного дослідів є достатнім. Після проведення експерименту і розшифровки записів за допомогою тарувального графіка визначалося середнє значення п'яти повторних вимірювань критерію оптимізації по кожному досліді і дані заносилися в робочу матрицю планування (табл. 2).

У цьому випадку необхідно знайти значення коефіцієнтів регресії рівняння (3.36) [8]:

$$y_u = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2. \quad (3)$$

Для визначення цих коефіцієнтів використовувалися рівняння (3.32)–(3.35) і дані табл. 3.32 [8] для двофакторного експерименту: $\alpha_1 = 0,2$; $\alpha_2 = 0,1$; $\alpha_3 = 0,125$; $\alpha_4 = 0,25$; $\alpha_5 = 0,125$; $\alpha_6 = 0,187$; $\alpha_7 = 0,1$.

Звідси: $b_0 = 759,38$; $b_1 = -51,81$; $b_2 = -90,6$; $b_{12} = -36,0$; $b_{11} = -2,35$; $b_{22} = -7,35$.

Таким чином, рівняння (3) набуває вигляду:

$$y_u = 759,38 - 51,81 x_1 - 90,6 x_2 - 36 x_1 x_2 - 2,35 x_1^2 - 7,35 x_2^2. \quad (4)$$

Гіпотеза про адекватність рівняння (4) перевіряється в такій послідовності.

Оскільки досліді дублювалися тільки в нульовій точці, то дисперсія адекватності згідно з рівнянням (4.48) [8]:

$$S_{ad}^2 = \frac{54,05 - 28,96}{3} = 8,36.$$

Дисперсія відтворюваності для цього випадку визначається за формулою (4.13) [8]:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{28,96}{4} = 7,24.$$

Знаючи число ступенів свободи для більшої ($f_{ad} = 3$) і меншої ($f_e = 4$) дисперсії [8], табличне значення критерію Фішера для 95%-ної довірчої ймовірності: $F_{табл} = 6,59$.

Розрахункове значення критерію Фішера згідно з формулою (4.35) [8]:

$$F_{розр(P)} = \frac{8,36}{7,24} = 1,154.$$

Порівняння табличного і розрахункового значень критерію Фішера показало, що рівняння (4) можна вважати адекватним з довірчою ймовірністю $\alpha_B = 0,95$, оскільки дотримується умова: $F_{табл} \geq F_{розр(P)}$.

Значущість коефіцієнтів регресії в рівнянні (4) перевіряється з урахуванням рівнянь (4.26)–(4.29) і (4.30)–(4.33) і даних табл. 4.3 [8] для випадку, коли $k_1 = 2$. У цьому випадку: $a_8 = 0,2$; $a_9 = 0,125$; $a_{10} = 0,1438$; $a_{11} = 0,25$.

$$\text{Отже: } S_{\{b_0\}}^2 = 0,2 \cdot 7,24 = 1,448 \text{ і } S_{\{b_0\}} = 1,2; \quad S_{\{b_i\}}^2 = 0,125 \cdot 7,24 = 0,905 \text{ і } S_{\{b_i\}} = 0,95;$$

$$S_{\{b_{ii}\}}^2 = 0,1438 \cdot 7,24 = 1,04 \text{ і } S_{\{b_{ii}\}} = 1,02; \quad S_{\{b_{ij}\}}^2 = 0,25 \cdot 7,24 = 1,81 \text{ і } S_{\{b_{ij}\}} = 1,35.$$

Звідси із співвідношень (4.26) – (4.29) [8]:

$$\Delta b_0 = \pm 2 \cdot 1,2 = \pm 2,4; \quad \Delta b_i = \pm 2 \cdot 0,95 = \pm 1,9; \quad \Delta b_{ii} = \pm 2 \cdot 1,02 = \pm 2,04; \quad \Delta b_{ij} = \pm 2 \cdot 1,35 = \pm 2,7.$$

Порівняння абсолютних величин коефіцієнтів регресії рівняння (4) і відповідних похибок в їх оцінюванні показує, що з довірчою ймовірністю 0,95 можна вважати значущими всі коефіцієнти.

Рівняння (4) є рівнянням регресії, що описує сумарну величину втрат під час виконання поздовжнього різання матеріалу нерухомим ножом залежно від відстані між транспортуючими валиками (x_1) і відстані між вертикальною віссю обертання транспортуючих валиків та кромкою леза ножа (x_2).

Враховуючи вирази (2), перейдемо до іменованих величин:

$$y_u = 759,38 - 51,81(h - 4,35) - 90,6 \left(\frac{a-5}{0,5} \right) - 36(h - 4,35) \left(\frac{a-5}{0,5} \right) - 2,35(h - 4,35)^2 - 7,35 \left(\frac{a-5}{0,5} \right)^2$$

Після спрощення рівняння набуває вигляду:

$$y_u = 328,64h - 455,1 + 426a - 72ah - 2,35h^2 - 29,4a^2 \quad (5)$$

Отриманий вираз (5) – експериментальна математична модель залежності величини сумарних втрат під час виконання поздовжнього різання від величини зазору між валиками і величини відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа.

Проведемо оброблення даних експерименту з визначення величини втрат на тертя матеріалу по грані нерухомого ножа. Матриця планування двофакторного експерименту представлена в табл. 3.

Таблиця 3

Матриця планування двофакторного експерименту з визначення величини втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа

Номер досліду	Матриця планування		Робоча матриця			Дані до розрахунку		
	x_1	x_2	h	a	y_u	y_u	$(y_u - \bar{y}_u)^2$	
1	1	1	5,35	5,5	490	494,91	24,1359	
2	-1	1	3,35	5,5	642	640,38	2,6120	
3	1	-1	5,35	4,5	712	712,85	0,7307	
4	-1	-1	3,35	4,5	736	730,33	32,1962	
5	-1,414	0	2,95	5	708	710,71	7,3700	
6	1,414	0	5,75	5	602	595,51	42,0580	
7	0	-1,414	4,35	4,3	744	744,96	0,9255	
8	0	1,414	4,35	5,7	532	527,29	22,2024	
9	0	0	4,35	5	642	646,56	20,7589	
10	0	0	4,35	5	648	646,56	2,0846	
11	0	0	4,35	5	650	646,56	11,8598	
12	0	0	4,35	5	646	646,56	0,3094	
13	0	0	4,35	5	646	646,56	0,3094	
					$\sum_{1}^{13} = 8398$	$\sum_{1}^{13} (y_u - \bar{y}_u)^2 = 167,55$		

Під час визначення числа вимірів для кожного досліду проводилося п'ять повторних вимірювань на нульовому рівні (досліди 9–13) і визначалося наближене значення середньоквадратичної похибки рівняння (1.10) [8]: $S_p = 1,118$.

Розрахункове значення критерію Стьюдента в цьому випадку: $t_{розр(P)} = 4,0001$.

Порівняння табличного значення критерію Стьюдента для $\alpha_B = 0,95$ і $n_1 = 5$ [8] і розрахункового значення показало, що виконується умова: $t_{розр(P)} \geq t_{табл}$.

Отже, число вимірювань $n_1 = 5$ для кожного досліду є достатнім. Після проведення експерименту і розшифровки записів за допомогою тарувального графіка визначали середнє значення п'яти повторних вимірювань критерію оптимізації по кожному досліду і дані заносилися в робочу матрицю планування (табл. 3.).

У цьому випадку необхідно знайти значення коефіцієнтів регресії рівняння (3.32) – (3.35) і дані табл. 3.32 [8] для двофакторного експерименту: $b_0 = 646,56$; $b_1 = -40,74$; $b_2 = -76,97$; $b_{12} = -32$; $b_{11} = 3,28$; $b_{22} = -5,22$.

Таким чином, рівняння (3) набуває вигляду:

$$y_u = 646,56 - 40,74x_1 - 76,97x_2 - 32x_1x_2 + 3,28x_1^2 - 5,22x_2^2. \quad (6)$$

Гіпотеза про адекватність рівняння (6) перевіряється відповідно до вищевикладеної методики.

Дисперсія адекватності:

$$S_{ад}^2 = \frac{167,55 - 35,32}{3} = 44,08.$$

Дисперсія відтворюваності для цього випадку:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{35,32}{4} = 8,83.$$

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_{розр(F)} = \frac{44,08}{8,83} = 4,99.$$

Порівняння табличного і розрахункового значень критерію Фішера показало, що рівняння (6) можна вважати адекватним з довірчою ймовірністю $\alpha_B = 0,95$, оскільки дотримується умова: $F_{табл} \geq F_{розр(P)}$.

Значущість коефіцієнтів регресії в рівнянні (6) перевіряли аналогічно викладеній методиці.

$$\text{Отже: } S_{\{b_0\}}^2 = 0,2 \cdot 8,83 = 1,766 \text{ і } S_{\{b_0\}} = 1,33; \quad S_{\{b_i\}}^2 = 0,125 \cdot 8,83 = 1,104 \text{ і}$$

$$S_{\{b_i\}} = 1,05; S_{\{b_{ii}\}}^2 = 0,1438 \cdot 8,83 = 1,27 \text{ і } S_{\{b_{ii}\}} = 1,127; \quad S_{\{b_{ij}\}}^2 = 0,25 \cdot 8,83 = 2,208 \text{ і } S_{\{b_{ij}\}} = 1,49.$$

Звідси із співвідношень (4.26) – (4.29) [8]:

$$\Delta b_0 = \pm 2 \cdot 1,33 = \pm 2,66; \quad \Delta b_i = \pm 2 \cdot 1,05 = \pm 2,1; \quad \Delta b_{ii} = \pm 2 \cdot 1,127 = \pm 2,254; \quad \Delta b_{ij} = \pm 2 \cdot 1,49 = \pm 2,98.$$

Порівняння абсолютних величин коефіцієнтів регресії рівняння (6) і відповідних похибок щодо їх оцінювання показує, що з довірчою ймовірністю 0,95 можна вважати значущими всі коефіцієнти.

Рівняння (6) є рівнянням регресії, що описує сумарну величину втрат під час виконання поздовжнього різання матеріалу нерухомим ножом залежно від відстані між транспортуючими валиками (x_1) і відстані між вертикальною віссю обертання транспортуючих валиків і кромкою леза ножа (x_2).

Враховуючи вирази (2), перейдемо до іменованих величин:

$$y_u = 646,56 - 40,74(h - 4,35) - 76,97 \left(\frac{a-5}{0,5} \right) - 32(h - 4,35) \left(\frac{a-5}{0,5} \right) + 3,28(h - 4,35)^2 - 5,22 \left(\frac{a-5}{0,5} \right)^2$$

Після спрощення рівняння набуває вигляду:

$$y_u = 250,72h - 257,86 + 333,26a - 64ah + 3,28h^2 - 20,88a^2. \quad (7)$$

Отриманий вираз (8) – експериментальна математична модель залежності величини втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа під час виконання поздовжнього різання нерухомим ножом, від величини зазору між валиками і величини відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа.

Отримані експериментальні моделі, а саме визначення сумарної величини втрат (5) та величини втрат на тертя матеріалу (8) дозволяють визначати погонне зусилля різання монолітної гуми (1). Підставляючи значення в рівняння (1), отримуємо середнє значення погонного зусилля монолітної гуми: $q_p = 3,22 \frac{H}{мм}$.

Відхилення від отриманих раніше значень роботи [4] становлять $\Delta = 1,6\%$.

Порівнюючи сумарні величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу під час використання ножа з двосторонньою заточкою (отримані автором у роботі [4]) та при використанні ножа з односторонньою заточкою, отримуємо: $\Delta P = \frac{991,04 - 759,38}{991,04} = 23,4\%$.

Визначене відхилення свідчить, що під час виконання операції поздовжнього різання матеріалу доцільно використовувати лезо ножа з односторонньою заточкою, що дозволить знизити сумарні величини втрат у порівнянні з двостороннім заточуванням, що, у свою чергу, знизить енергетичні витрати на процес.

Висновки та пропозиції. Отримані рівняння регресії описують сумарну величину втрат при поздовжньому різанні матеріалу та величину втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа з односторонньою заточкою. Порівняння сумарних величин втрат при поздовжньому різанні матеріалу ножами різних геометричних форм (з односторонньою та двосторонньою заточкою) дозволяє зробити висновки, що під час проектування машин для двійння та вирівнювання деталей низу взуття по товщині доцільно обирати лезо ножа з односторонньою заточкою, що дозволить знизити енергетичні витрати на процес.

Список використаних джерел

1. Князев В. І. Визначення похибки обробки при двійнні деталей низу взуття / В. І. Князев, В. С. Черно-Іванов // Легка промисловість. – 1997. – № 1. – С. 59.
2. Макацьора Д. А. Аналіз раціонального положення ножа та форми його поперечного перерізу в машинах типу “ДН” / Д. А. Макацьора, В. І. Князев // Вісник КНУТД. – 2004. – № 1. – С. 159–163.
3. Макацьора Д. А. Визначення погонного зусилля різання мікропористої гуми ножом з двосторонньою заточкою / Д. А. Макацьора // Вісник ЧДТУ. – 2013. – № 2 (65). – С. 92–97.
4. Черно-Іванов В. С. Розробка механізму повздовжнього різання деталей низу взуття : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.10 / В. С. Черно-Іванов. – К., 1998. – 18 с.
5. Макацьора Д. А. Визначення погонного зусилля різання монолітної гуми ножом з двосторонньою заточкою / Д. А. Макацьора, І. В. Панасюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 1. – С. 31–35.
6. Макацьора Д. А. Визначення погонного зусилля різання повсті ножом з двосторонньою заточкою / Д. А. Макацьора, І. В. Панасюк // Вісник КНУТД. – 2014. – № 1 (75). – С. 41–48.
7. Деклараційний патент (України) 70012А. Спосіб визначення потужності, що витрачається на повздовжнє різання матеріалу / Д. А. Макацьора, В. І. Князев ; опубл. 2004, Бюл. № 9.
8. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.