

**ОТРИМАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СИЛ РІЗАННЯ ПРИ  
РОЗРІЗАННІ НАВПІЛ ЗНОШЕНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН**

У ході даної роботи було проведено ортогональне центральне композиційне планування з ядром у виді повного факторного експерименту та проведені дослідження процесу обробки різанням зношеної пневматичної шини Bridgestone розміром 7.1/11.0-5, за допомогою ріжучого інструменту зі сплавів марок Р6М5 і Т15К6, в результаті якого був отриманий масив даних – приведених сил різання. Використавши створену матрицю планування повного факторного експерименту та отриманий у ході дослідження масив даних, з використанням програми Microsoft Excel 2013, були розраховані коефіцієнти регресії, котрі лягли в основу математичної моделі у вигляді поліному другого порядку. Створена математична модель виражає залежність сил різання від сукупності геометричних параметрів і твердості матеріалу ріжучого інструменту та режимних параметрів обробки різанням, відповідно, за її допомогою можна визначити сукупність оптимальних геометричних параметрів і матеріалу ріжучого інструменту та режимних параметрів, які будуть забезпечувати мінімізацію сил різання, а отже, і енерговитрат на процес різання загалом.

**Ключові слова:** повний факторний експеримент, математична модель, ріжучий інструмент, сили різання, пневматична шина, утилізація шин, попереднє подрібнення шин, обробка різанням гуми.

**Постановка проблеми.** Процес утилізації зношених пневматичних шин включає стадію попереднього подрібнення, яка складається з двох операцій: розрізання шин навіпіл уздовж бігової доріжки та вирізання бортових кілець [1]. Правильний вибір сукупності оптимальних геометричних параметрів та матеріалу ріжучого інструменту, оптимальних режимних параметрів процесу обробки різанням має зробити процес різання максимально енергоефективним, а ріжучий інструмент максимально довговічним, що, в свою чергу, впливає на загальну ефективність та економічну доцільність попереднього подрібнення шин обробкою різанням. Значною проблемою є складність математичного моделювання процесу різання шин, оскільки існує велика кількість взаємовпливаючих параметрів ріжучого інструменту і процесу обробки, а також різноманітні властивості шини (пола форма, велика механічна зносостійкість, пружні властивості матеріалу, наявність металічного кордуну та текстилевих волокон, хімічний склад гуми, тощо), що зумовлює труднощі та нестабільність обробки [2]. Саме цим можна пояснити невелику кількість публікацій присвячених цьому питанню, та неоднозначність їх висновків.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Аналіз літературних джерел показав відсутність публікацій, які безпосередньо відносяться до проблеми створення математичної моделі формування сил різання при обробці різанням зношених пневматичних шин, натомість, існує низка робіт, які опосередковано стосуються даного питання. Створенням математичної моделі формування сил різання при фрезерній обробці зношених шин займалися Козарь Д.М і Крауиньш П.Я. [2], дослідженням процесу токарної обробки гумованих валів займалися Мкртчян А.Ф., Музафаров Р.С. [3], дослідженнями впливу геометрії та матеріалу ріжучого інструмента на сили різання при розрізанні зношених пневматичних шин - Коржавін Ю.А., Сичов С.Ю., Сасов О.О., Коробочка О.М., Скорняков Е.С [4], [5], [6], питанням планування експерименту при пошуку оптимальних умов займалися Адлер Ю.П., Маркова Ю.В., Грановський Ю.В. [6].

**Мета роботи.** Побудувати ортогональний центральний композиційний план другого порядку і провести експеримент з вивчення впливу геометричних параметрів і матеріалу ріжучого інструменту та режимних параметрів обробки на формування сил різання. Засновуючись на отриманому масиві даних побудувати математичну модель формування сил різання в залежності від впливу вищезазначених факторів.

**Матеріали досліджень.** На першому етапі даної роботи за допомогою САПР КОМПАС-3D V16 була створена схема розташування приведених сил різання по координатних осях (рис.1). В даному випадку, в процесі різання відсутня поздовжня подача, тож можна вважати, що усі сили діють в одній площині. Було обрано  $k = 6$  критеріїв для оптимізації – кути ріжучого

інструменту:  $\gamma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\alpha$ ; твердість ріжучого інструменту: HRA; режимні параметри процесу різання:  $n$ ,  $S_p$ .

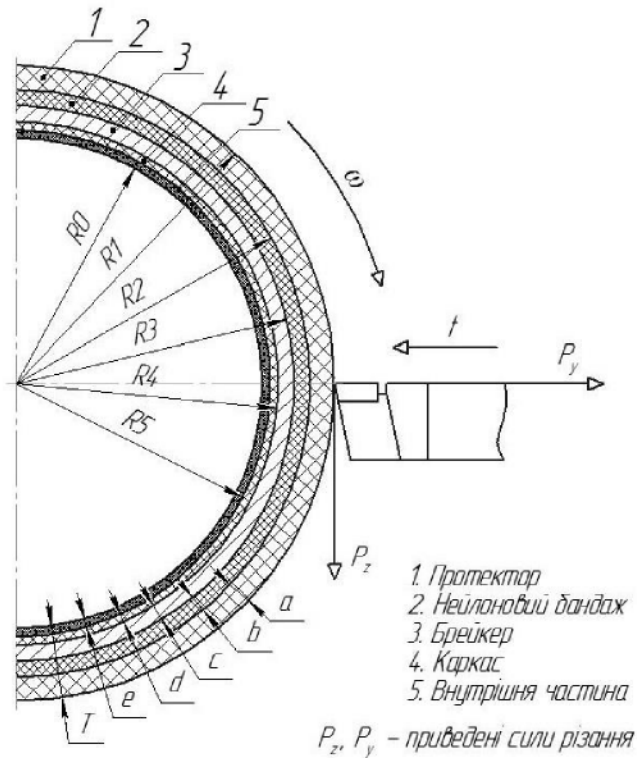


Рис. 1. Схема розташування приведених сил різання по координатних осях

На другому етапі значення факторів було закодовано шляхом лінійного перетворення координат факторного простору з переносом початку координат в нульову точку та вибором масштабів по осям у одиницях інтервалів варіювання факторів.

$$x_i = \frac{c_i - c_{0i}}{\Delta c},$$

де  $x_i$  – кодоване значення фактору (безрозмірна величина);  $c_i - c_{0i}$  – натуральне значення фактору (відповідно поточне і на нульовому рівні);  $\Delta c$  – натуральне значення інтервалу варіювання [7].

Після кодування отримуємо значення факторів, рівні +1 (верхній рівень) і -1 (нижній рівень).

Величина плеча  $\alpha$  «зіркових» точок визначається за формулою:

$$\alpha = \sqrt{\frac{n\varphi - 2^k}{2}}, \text{ де } \varphi = \sqrt{\frac{2^k}{n}}; n = 2^k + 2k + 1,$$

але, так як при розрахунковій величині  $\alpha$  нижні рівні варіювання деяких параметрів не відповідають фізичним можливостям обладнання, то були обрані інші табличні значення  $\alpha = 1$ , 596 та  $\varphi = 0,863$  [7].

Значення факторів наведені у таблиці 1.

На третьому етапі створено матрицю планування повного факторного експерименту (табл. 2). За умови наявності 6 критеріїв оптимізації у якості ядра був використаний повний факторний експеримент, кількість дослідів у ядрі  $2^k = 64$ , у «зіркових» точках –  $2k = 12$ , у центрі плану - 1. Кожен стовбець в матриці планування називають вектор-стовбцем, а рядок – вектор-рядком. Варіювання факторів в матриці планування виконується наступним чином: в першому стовбці знаки чергуються через один, у другому – через два, у третьому – через чотири, у четвертому – через вісім і так далі по ступеням двійки [7]. У «зіркових» точках значення усіх факторів, окрім фактору з плечем  $\alpha$  залишаються на нульовому рівні. В центральній точці плану значення усіх факторів на нульовому рівні варіювання.

Варіанти взаємодії факторів між собою були знайдені шляхом перебору. З урахуванням взаємодії факторів матриця повного факторного експерименту містить сім вектор-стовбців незалежних змінних, де  $x_0$  представляє кодоване значення вільного члена, а також 63 вектор-стовбці взаємодіючих факторів.

Рівні варіювання факторів

Найменування факторів	Позначення факторів	Рівні варіювання					Інтервали варіювання
		-1,596*	-	0	+	+1,596*	
Частота обертання - п, об/хв	$x_1$	160	250	630	1000	1600	370
Подача - $S_p$ , мм/об	$x_2$	0,06	0,1	0,25	0,4	0,6	0,15
Передній кут - $\gamma$ , град	$x_3$	16	10	20	30	48	10
Кут при вершині - $\epsilon$ , град	$x_4$	27	45	60	75	120	15
Задній кут, $\alpha$ , град	$x_5$	16	10	15	20	34	5
Твердість матеріалу різця, HRA	$x_6$	38	64	77	90	144	13

Таблиця 2

Матриця планування повного факторного експерименту з урахуванням взаємодії факторів (скорочена)

№ п/п	Кодовані значення факторів в експерименті												$P_z$	$P_y$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_1 - \varphi$	$x_2 - \varphi$	...	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6$		
1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0,137	0,137	...	1	-1	$P_{z1}$	$P_{y1}$
2	1	1	-1	-1	1	-1	-1	0,137	0,137	...	1	1	$P_{z2}$	$P_{y2}$
3	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,137	0,137	...	-1	1	$P_{z3}$	$P_{y3}$
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	0,137	0,137	...	-1	-1	$P_{z4}$	$P_{y4}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
74	1	0	0	0	0	-1,215	0	-0,863	-0,863	...	0	0	$P_{z74}$	$P_{y74}$
75	1	0	0	0	0	1,215	-1,215	-0,863	-0,863	...	0	0	$P_{z75}$	$P_{y75}$
76	1	0	0	0	0	0	1,215	-0,863	-0,863	...	0	0	$P_{z76}$	$P_{y76}$
77	1	0	0	0	0	0	0	-0,863	-0,863	...	0	0	$P_{z77}$	$P_{y77}$

На третьому етапі було проведено експериментальне дослідження згідно розробленого плану за допомогою комплексу вимірювального обладнання, який складається з вимірювальної головки УДМ-100, міліамперметра та підсилювача ТА-5, та експериментальної установки на базі токарно-гвинторізного верстата 16К20 [6]. В якості ріжучого інструменту були використані різьбові різці зі сплавів марок Р6М5 і Т15К5.

Експериментальна установка на базі токарно-гвинторізного верстата 16К20 (рис. 2) представляє собою консоль з вимірювальною голівкою УДМ-100, яка закріплена на столі верстата, котрий підводиться перпендикулярно до осі шпинделя, у шпинделі закріплений кондуктор з надією на нього шиною. Сили різання були визначені під час розрізання навпіл картингових шин Bridgestone, розміром 7.1/11.0-5 з текстильним кордом. Межа міцності при розтягуванні зразка матеріалу шини складає  $\sigma_p = 4,6$  МПа [4].

Дані експерименту наведені у скороченому вигляді в таблиці 3.

На четвертому етапі був проведений аналіз отриманих експериментальних даних на предмет наявності окремих грубих помилок вимірів (викидів), а також оцінка дисперсії відтворюваності експериментальних даних.

Дані експерименту (скорочена)

№ п/п	n, хв <sup>-1</sup>	S <sub>p</sub> , мм/об	γ, град	ε, град	α, град	Твердість, HRA	P <sub>z</sub> , Н	P <sub>y</sub> , Н
1	250	0.1	10	75	10	64	122	54
2	1000	0.1	10	75	10	64	74	32
...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	250	0.4	30	45	20	64	159	34
32	1000	0.4	30	45	20	64	97	18
...	...	...	...	...	...	...	...	...
63	250	0.4	30	45	20	90	120	26
64	1000	0.4	30	45	20	90	75	14
...	...	...	...	...	...	...	...	...
75	630	0,25	20	60	15	38	158	44
76	630	0,25	20	60	15	144	58	17
77	630	0,25	20	60	15	77	94	27

Для розрахунку дисперсії відтворюваності та перевірки рівноточності вимірів було проведено нерівномірне дублювання вимірів в окремих точках плану, кількість яких  $N_1 = 5$ , у кожній з них досліди проведені  $\gamma_u$  разів,  $u = 1 \div N_1$ .

Вибіркова оцінка дисперсії в  $u$ -му досліді розраховується за формулою:

$$S_{yu}^2 = \frac{1}{\gamma_u - 1} \sum_{1 \leq i \leq \gamma_u} (y_{ui} - \bar{y}_{ui})^2.$$

Середнє арифметичне значення відгуку в  $u$ -й точці плану визначається за формулою:

$$\bar{y}_{ui} = \frac{1}{\gamma_u} \sum_{1 \leq i \leq \gamma_u} y_{ui},$$

зі ступенями свободи:

$$f_u = \gamma_u - 1.$$

Оцінка дисперсії відтворюваності вимірів під час реалізації плану експерименту визначається як середнє зважене:

$$S_{\text{відтв}}^2 = \frac{\sum_{1 \leq u \leq N_1} f_u S_{yu}^2}{\sum_{1 \leq u \leq N_1} f_u},$$

зі ступенями свободи:

$$f_{\text{відтв}} = \sum_{1 \leq u \leq N_1} f_u = \sum_{1 \leq u \leq N_1} \gamma_u - N_1.$$

Перевірка рівноточності вимірів (однорідності ряду оцінок дисперсій  $S_{y_1}^2, S_{y_2}^2, \dots, S_{y_{N_1}}^2$ ) виконується за допомогою Критерію Кохрена (G-статистика):

$$G^{\text{ек}} = \frac{\max_{1 \leq u \leq N_1} S_{yu}^2}{\sum_{1 \leq u \leq N_1} S_{yu}^2},$$

з числом ступенів свободи:

$$f_1 = f_u = \gamma - 1 \text{ і } f_2 = N_1.$$

Експериментальні значення  $G^{\text{ек}}$  критерію порівнюються власне з табличними значеннями  $G^T$  – статистики. Якщо  $G^{\text{ек}} \leq G_{\alpha, f_1, f_2}^T$ , то при обраному рівні значимості  $\alpha$  гіпотеза о рівноточності вимірів (однорідності оцінок дисперсій) не відкидається [7].

В нашому випадку  $G_1^{\text{ек}} \leq G_{\alpha, f_1}^T$  і  $G_2^{\text{ек}} \leq G_{\alpha, f_2}^T$ , а отже виміри проведені рівноточно.

Результати розрахунків до цього етапу роботи наведені у таблиці 4 нижче.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

На п'ятому етапі, після аналізу отриманих експериментальних даних, були розраховані коефіцієнти регресії та проведена оцінка їх значимості.

Таблиця 4

Результати розрахунків до аналізу результатів експерименту (скорочена)

N <sub>1</sub>	γ <sub>u</sub>	Y <sub>u1</sub> , H	Y <sub>u2</sub> , H	$\overline{Y_{u1}}$	$\overline{Y_{u2}}$	S <sup>2</sup> <sub>yu1</sub>	S <sup>2</sup> <sub>yu2</sub>	S <sup>2</sup> <sub>відтв1</sub>	S <sup>2</sup> <sub>відтв2</sub>	G <sub>1</sub> <sup>ек</sup>	G <sub>1</sub> <sup>ек</sup>	Табличне значення для рівня значимості 5%	
1	1	122	54	121,6	54,4	4,8	1,3	4,36	2,64	0,27	0,35	0,5441	0,5065
	2	125	53	121,6	54,4								
	3	121	56	121,6	54,4								
	4	119	54	121,6	54,4								
	5	121	55	121,6	54,4								
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5	1	69	19	69,4	19,6	2,8	2,3	4,36	2,64	0,27	0,35	0,5441	0,5065
	2	68	18	69,4	19,6								
	3	72	22	69,4	19,6								
	4	68	20	69,4	19,6								
	5	70	19	69,4	19,6								

При ортогональному плануванні коефіцієнти рівняння регресії визначаються незалежно один від одного за наступними формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n Y_u}{n}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \overline{Y_u}}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2};$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \overline{Y_u}}{\sum_{u=1}^n (x_{iu} x_{ju})^2}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n (x'_{iu})^2 \overline{Y_u}}{\sum_{u=1}^n [(x'_{iu})^2]^2};$$

де i, j – номери стовбців матриці планування; x<sub>iu</sub> – елементи i-го стовбця [7].

Для пришвидшення та автоматизації, усі розрахунки були проведені в програмі Microsoft Excel 2013.

Результати розрахунків наведені у таблицях 5 та 6.

Таблиця 5

Коефіцієнти регресії для рівняння P<sub>z</sub> (скорочена)

№ п/п	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>11</sub>	B <sub>22</sub>	...	b <sub>23456</sub>	b <sub>123456</sub>
1	118	-118	-118	-118	118	-118	-118	16,71	16,71	...	118	-118
2	74	74	-74	-74	74	-74	-74	10,14	10,14	...	74	74
3	171	-171	171	-171	171	-171	-171	23,43	23,43	...	-171	171
4	119	119	119	-119	119	-119	-119	16,3	16,3	...	-119	-119
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
74	59	0	0	0	0	71,69	0	-136	-136	...	0	0
75	158	0	0	0	0	0	-192	-50,9	-50,9	...	0	0
76	58	0	0	0	0	0	70,47	-14,7	-14,7	...	0	0
77	94	0	0	0	0	0	0	-81,1	-81,1	...	0	0
b	100,71	-22,55	19,28	1,20	10,79	-1,74	-15,15	7,28	10,05	...	-0,70	0,33

Перевірка значимості коефіцієнтів рівняння регресії проведена за допомогою t-критерію Стьюдента:

$$t = \frac{|b_i|}{S_{bi}}, \quad \text{де } S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}.$$

Оцінки дисперсій S<sup>2</sup><sub>bi</sub> коефіцієнтів рівняння регресії розраховані відповідно за формулами [7]:

$$S_{b0}^2 = \frac{S_{\text{відтв}}^2}{n}; \quad S_{bi}^2 = \frac{S_{\text{відтв}}^2}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2};$$

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

$$S_{bi}^2 = \frac{S_{\text{відтв}}^2}{\sum_{u=1}^n (x_{iu}x_{ju})^2}; \quad S_{bii}^2 = \frac{S_{\text{відтв}}^2}{\sum_{u=1}^n [(x'_i)^2]^2}$$

Таблиця 6

Коефіцієнти регресії для рівняння  $P_y$  (скорочена)

№ п/п	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_{11}$	$b_{22}$	...	$b_{23456}$	$b_{123456}$
1	54	-54	-54	-54	54	-54	-54	7,398	7,398	...	54	-54
2	32	32	-32	-32	32	-32	-32	4,384	4,384	...	32	32
3	62	-62	62	-62	62	-62	-62	8,494	8,494	...	-62	62
4	34	34	34	-34	34	-34	-34	4,658	4,658	...	-34	-34
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
74	34	0	0	0	0	41,31	0	-29,3	-29,3	...	0	0
75	44	0	0	0	0	0	-53,5	-38	-38	...	0	0
76	17	0	0	0	0	0	20,66	-14,7	-14,7	...	0	0
77	27	0	0	0	0	0	0	-23,3	-23,3	...	0	0
$b$	31,73	-8,73	2,20	-9,62	0,06	-0,81	-4,51	-3,12	-3,27	...	-0,05	0,08

Результати розрахунків з перевірки значимості коефіцієнтів рівняння регресії наведені в таблиці 7.

Таблиця 7

Результати розрахунків з перевірки значимості коефіцієнтів рівняння регресії (скорочена)

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_{11}$	$b_{22}$	...	$b_{23456}$	$b_{123456}$
$S^2_1$	0,057	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,43	0,43	...	0,068	0,068
$S^2_2$	0,034	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,26	0,26	...	0,04	0,04
$S_1$	0,238	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255	0,656	0,656	...	0,261	0,261
$S_2$	0,185	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,51	0,51	...	0,203	0,203
$t_1$	423,2	88,37	75,55	4,694	42,27	6,811	59,38	1,814	6,031	...	2,694	1,257
$t_2$	171,3	43,97	11,09	48,45	0,327	4,093	22,7	6,123	6,408	...	0,231	0,385
Значимість $b_{11}$	+	+	+	+	+	-	+	-	+	...	+	-
Значимість $b_{12}$	+	+	+	+	-	+	+	+	+	...	-	-

На останньому етапі були побудовані, власне, рівняння регресії другого порядку.

Рівняння регресії при ортогональному центральному композиційному плануванні другого порядку в загальному виді має форму [7]:

$$y_0 = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{\substack{1 \leq i \leq k \\ 1 \leq j \leq k \\ i \neq j}} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2.$$

З урахуванням значимості коефіцієнтів рівняння регресії та умови закодованості факторів, для кожної з сил -  $P_z$  та  $P_y$  рівняння регресії отримують вигляд:

$$P_z = 89,765696 + 25,762075 \cdot \alpha - 431,423656 \cdot S_p - 0,484727 \cdot HRA - \\ - 4,645511 \cdot \varepsilon + 0,208277 \cdot n + 11,409473 \cdot HRA \cdot S_p - \\ - 0,048427 \cdot HRA \cdot \alpha - 0,007717 \cdot HRA \cdot \varepsilon + 20,10734 \cdot S_p \cdot \alpha + \\ + 8,647541 \cdot S_p \cdot \varepsilon - 0,001976 \cdot HRA \cdot n - 0,414186 \cdot S_p \cdot n - \\ - 0,154706 \cdot \alpha \cdot \varepsilon - 0,022774 \cdot \alpha \cdot n - 0,004634 \cdot \varepsilon \cdot n - \\ - 0,18637 \cdot S_p \cdot \alpha \cdot \varepsilon + 0,000198 \cdot HRA \cdot \alpha \cdot n + 0,000039 \cdot HRA \cdot \varepsilon \cdot n + \\ + 0,028272 \cdot S_p \cdot \alpha \cdot n + 0,006929 \cdot S_p \cdot \varepsilon \cdot n + 0,000361 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot n -$$

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

$$\begin{aligned} & -0,74821 \cdot HRA \cdot S_p \cdot \alpha - 0,17842 \cdot HRA \cdot S_p \cdot \varepsilon - 0,001381 \cdot HRA \cdot S_p \cdot n + \\ & + 0,000819 \cdot HRA \cdot \alpha \cdot \varepsilon + 0,009296 \cdot HRA \cdot S_p \cdot \alpha \cdot \varepsilon \\ & + 0,000159 \cdot HRA \cdot S_p \cdot \alpha \cdot n - 0,000003 \cdot HRA \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot n - \\ & - 0,000585 \cdot S_p \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot n + 175,555556 \cdot S_p^2 - 0,5168 \cdot \alpha^2 + 0,058978 \cdot \varepsilon^2 \\ P_y = & 101,897968 + 1,760092 \cdot HRA + 112,705327 \cdot S_p + 3,93 \cdot \alpha - \\ & - 4,50482 \cdot \varepsilon - 0,023707 \cdot n + 0,00024 \cdot HRA \cdot n - 0,031894 \cdot S_p \cdot n + \\ & + 0,000085 \cdot \varepsilon \cdot n - 0,015917 \cdot HRA^2 - 145,333333 \cdot S_p^2 - 0,1364 \cdot \alpha^2 + \\ & + 0,036578 \cdot \varepsilon^2 - 0,000022 \cdot n^2 \end{aligned}$$

**Висновки.** У результаті проведеної роботи ми отримали математичну модель формування сил різання в процесі обробки різанням зношеної шини, яка складається з двох рівнянь регресії другого порядку, відповідно для сил  $P_z$  і  $P_y$ . Отримана математична модель у подальшому може бути використана для оптимізації режимних параметрів процесу обробки та вибору оптимальних геометричних параметрів і матеріалу ріжучого інструменту.

### Інформаційні джерела

1. Пат. № 56698 України. Спосіб переробки зношених шин загального призначення та великогабаритних автомобільних шин [Текст] / Е.С. Скорняков, О.М. Коробочка, О.О. Сасов, В.С. Авер'янов; власник – Дніпродзержинський державний технічний університет. – № u 2010 08087; заяв. 29.06.2010; публ. 25.01.2011, Бюл. №2.
2. Козарь Д.М., Крауиньш П.Я. Кинематика и динамика формирования сил резания при фрезеровании упругой оболочки: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана "Наука и образование".
3. Мкртчян А.Ф., Музафаров Р.С. Особенности механической обработки гуммированных валов бумагоделательных машин.
4. Коржавін Ю.А., Сичов С.Ю., Експериментальні дослідження впливу геометрії ріжучого інструмента з титан-вольфрамових сплавів на сили різання при розрізанні зношених пневматичних шин./ Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»//м. Луцьк червень 2016 р. – Луцьк: ЛНТУ, – Вип. 8 (1) – 2016. С.110-115
5. Сасов О.О. Дослідження впливу геометрії та матеріалу ріжучого інструменту на сили різання при попередньому подрібненні зношених пневматичних шин: стаття [Текст] / О.О. Сасов, Ю.А. Коржавін, О.М. Коробочка // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»//м. Луцьк грудень 2015 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2015. – С.104-107.
6. Скорняков Е.С. Дослідження особливостей подрібнення різанням пневматичних шин при утилізації [Текст] /Е.С. Скорняков, О.О Сасов, Ю.А. Коржавін, С.В. Калініченко, Я.В. Яковенко і др.// Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»//м.Луцьк травень 2015 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2015. – С.83-87.
7. Барвинок В.А., Бордаков П.А. Математическое планирование эксперимента в производстве летательных аппаратов - Учебное пособие. — Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1990. — 64 с.

**Сасов А.А., к.т.н., Аверьянов В.С., к.т.н., Коржавин Ю.А., к.т.н., Соколов А.Д., магистрант**

Днепропетровский государственный технический университет

### **ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ РАЗРЕЗАНИИ ПОПОЛАМ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН**

*В ходе данной работы было проведено ортогональное центральное композиционное планирование с ядром в виде полного факторного эксперимента и проведено исследование процесса обработки резаньем изношенной пневматической шины Bridgestone размером 7.1/11.0-5, при помощи режущего инструмента со сплавов марок Р6М5 и Т15К6, в результате которого был получен массив данных – приведённых сил резания. Используя созданную матрицу планирования полного факторного эксперимента и полученный в ходе эксперимента массив данных, с использованием программы Microsoft Excel 2013, были рассчитаны коэффициенты регрессии, которые легли в основу математической модели в виде полинома второго порядка. Созданная математическая модель выражает зависимость сил резания от совокупности геометрических параметров и твёрдости материала режущего инструмента, а также режимных параметров обработки резанием, соответственно, с её помощью можно определить совокупность оптимальных геометрических параметров и материала режущего*

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

*инструмента, а также режимных параметров, которые будут обеспечивать минимизацию сил резания, следовательно, и энергозатрат на процесс резания в целом.*

**Ключевые слова:** *полный факторный эксперимент, математическая модель, режущий инструмент, силы резания, пневматическая шины, утилизация шин, предварительное измельчение шин, обработка резанием резины.*

**Sasov A.A., Averianov V.S., Korzhavin Y.A., Sokolov A.D.**

Dneprovskiy State Technical University, Kamenskoe, Ukraine

### **OBTAINING A MATHEMATICAL MODEL OF FORMING FORCES DURING THE PROCESS OF CUTTING WORN OUT AUTOMOBILE TIRES**

*In the course of this work, orthogonal central compositional planning was performed with a core in the form of a full factor experiment and a study was made of the process of cutting the worn-out Bridgestone pneumatic tire measuring 7.1 / 11.0-5, using a cutting tool from the P6M5 and T15K6 alloys, resulting in an data array - the resultant cutting forces. Using the created matrix of planning of the full factorial experiment and the data array obtained in the course of the experiment, using Microsoft Excel 2013 program, the regression coefficients were calculated, which formed the basis of the mathematical model in the form of a second-order polynomial. The created mathematical model expresses the dependence of the cutting forces on the set of geometric parameters and the hardness of the material of the cutting tool, as well as the operating parameters of the cutting, and accordingly it can determine the set of optimal geometric parameters and material of the cutting tool, as well as the regime parameters that will ensure the minimization of forces Cutting, and, consequently, energy consumption for the cutting process as a whole.*

**Key words:** *full factorial experiment, mathematical model, cutting tool, cutting forces, pneumatic tires, tire recycling, preliminary tire shredding, rubber cutting.*