

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ В ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ



**О.О. САСОВ**, к.т.н., доцент

**О.М. КОРОБОЧКА**, д.т.н., професор

**Н.М. ВОЛОСОВА**, к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## Математичне моделювання формування сил різання при розрізанні автомобільних пневматичних шин навпіл

Отримана математична модель формування сил різання при розрізанні навпіл зношених автомобільних пневматичних шин ріжучим інструментом зі сплавів марок Р6М5 і Т15К6. Математична модель виражає залежність сил різання від сукупності геометричних параметрів і твердості матеріалу ріжучого інструменту і режимних параметрів обробки різанням. За її допомогою можна визначити сукупність оптимальних геометричних параметрів, матеріалу ріжучого інструменту і режимних параметрів, що забезпечують мінімізацію сил різання і енерговитрат на процес різання в цілому. Адекватність уточненої моделі була підтверджена оцінкою однорідності дисперсій розрахункових і експериментальних значень сил різання за допомогою статистичного критерію Фішера. Визначено ефективні режимні параметри: частота обертання шпинделя верстата і подача ріжучого інструменту, геометричні параметри і твердість матеріалу ріжучого інструменту, які забезпечують мінімальні енергетичні витрати. Проведено порівняльний аналіз енерговитрат процесу розрізання зношених шин навпіл до оптимізації режимних параметрів та після неї.

The resulting mathematical model of the formation of cutting forces in the cutting of worn-out automobile pneumatic tires in half with a cutting tool made of alloy grades P6M5 and T15K6. The mathematical model expresses the dependence of the cutting forces on the set of geometric parameters and hardness of the material of the cutting tool and the operating parameters of the cutting. With its help, it is possible to define a set of optimal geometric parameters, cutting tool material and operating parameters that ensure minimization of cutting forces and energy consumption for the cutting process as a whole. The adequacy of the refined model was confirmed by an estimate of the homogeneity of variances in the calculated and experimental values of the cutting forces using the Fisher statistical test. The effective mode parameters are determined: the speed of the spindle of the machine and the feeding of the cutting tool, the geometric parameters and the hardness of the material of the cutting tool, which ensure minimum energy costs. A comparative analysis of the energy consumption of the process of cutting the worn out tires in half to optimize the operating parameters and after it.

### Постановка проблеми

На сьогоднішній день зберігання та утилізація зношених автомобільних шин є гострою проблемою усіх розвинених країн світу. В Україні щорічний приріст зношених автомобільних покришок коливається в межах 250—300 тисяч тон, з яких близько 72 % складають шини з металічним кордом [1]. До теперішнього часу замість відповідної утилізації автомобільних шин відпрацьований матеріал масово викидають на звалища або спалюють. За різними даними, лише до 10 % використаних покришок ліквідують відповідно до екологічних норм [2].

Механічне подрібнення різанням зношених автомобільних шин з різною жорсткістю гуми, пов'язане з відомими труднощами [3], обумовленими пружними властивостями гуми, а також багатшаровістю з різних матеріалів: гума, текстиль та металокорд. У процесі подрібнення різанням матеріали шини піддаються різноманітним статичним і динамічним деформаціям: розтягування, стиснення, вигину і т. д. Неправильний вибір геометрії ріжучого інструменту і режимів різання спричиняє підвищений знос ріжучого інструменту, а іноді і його поломку, підвищуються енергетичні витрати тех-

нологічного обладнання. Зважаючи на це, актуальним завданням щодо подальшого удосконалення технологічних процесів утилізації зношених шин є вибір і обґрунтування сукупності оптимальних геометричних параметрів та матеріалу ріжучого інструменту, оптимальних режимних параметрів процесу різання.

### Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій

Процес утилізації зношених пневматичних шин включає стадію попереднього подрібнення, яка складається з двох операцій: розрізання шин навпіл уздовж бігової доріжки та вирізання бортових кілець [4].

У процесі різання до ріжучого інструменту прикладаються певні зусилля, тобто сили різання, які виникають при зрізанні шару гуми, корду та каркасу. Сила опору є результатом впливу різних сил, які діють на ріжучий інструмент. Рівнодіючу Р всіх сил тиску оброблюваного матеріалу на ріжучий інструмент можна геометрично розкласти на три взаємно перпендикулярні складові:  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ . При подрібненні різанням навпіл пневматичних шин — це сили  $P_z$  та  $P_y$ . Вертикальна сила  $P_z$  (з боку ріжучого інструменту) перешкоджає обертанню шини і прогинає її, радіальна сила  $P_y$  прагне прогну-

ти шину поперечно. На подолання сили  $P_z$  витрачається майже вся потужність, споживана на різання. Це пояснюється тим, що сила  $P_z$  збігається за напрямом із швидкістю різання, яка в сотні разів більше швидкості подачі різця. На силу  $P_y$  при різанні потужність не витрачається, так як в цьому напрямку рух відсутній. Тому для наближених практичних розрахунків зусиллям різання при різанні прийнято вважати силу  $P_z$  [5—7].

Сила різання має важливе значення, так як при множенні її на радіус оброблюваної деталі ми отримуємо крутний момент. Він показує, наскільки за даних умов роботи навантажений верстат, і чи небезпечно це навантаження для найбільш слабких його ланок. При множенні сили різання на швидкість різання визначають потужність, потрібну на різання. Зіставляючи цю потужність з дійсною потужністю верстата, можна судити про те, наскільки раціонально верстат використовується [5, 6].

До основних параметрів процесу різання відносять: глибину і швидкість різання, подачу, ширину і товщину шару матеріалу, що зрізується, та номінальну площу його перерізу. Чим більше подача і глибина різання, тим більше сили, що діють на різець, і температура різання. Від цього інтенсивніше зношується різець і тим меншу швидкість різання допускати ріжучий інструмент при одній і тій же стійкості [6—10].

Швидкість різання при обробці пневматичних шин — це один з основних факторів, який визначає продуктивність процесу різання. На швидкість різання впливають наступні фактори: стійкість ріжучого інструменту, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу, матеріал ріжучої частини інструменту, подача і глибина різання, геометричні елементи ріжучої частини [5—9].

Значний вплив на швидкість різання мають геометричні параметри різальної частини інструменту. Із збільшенням переднього кута  $\gamma$  зменшуються деформації оброблюваного матеріалу, сили різання і, відповідно, зменшується спрацювання різця. Якщо збільшувати передній кут різця, то погіршується тепловідведення внаслідок зменшення площі поперечного перетину різальної частини інструменту, тому треба зменшувати швидкість різання. Виходячи з цього виникає актуальна задача вибору геометричних параметрів ріжучого інструменту та ефективних режимних параметрів процесу обробки [7, 8].

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. Це впливає на загальну ефективність та економічну доцільність попереднього подрібнення шин обробкою різанням [7—11].

Значною проблемою є складність математичного моделювання процесу різання шин, оскільки існує велика кількість взаємопов'язаних параметрів ріжучого інструменту і процесу обробки, а також різноманітні властивості шини. Пола форма шини, велика механічна зносостійкість, пружні властивості матеріалу, наявність металічного корду та текстильних волокон, хімічний склад гуми зумовлює труднощі та нестабільність процесу різання [11—12]. Саме цим можна пояснити невелику кількість публікацій, присвячених цьому питанню, та

неоднозначність висновків, що обумовлюють необхідність проведення подальших досліджень в цьому напрямку.

#### Мета роботи

Метою роботи є визначення оптимальних режимних параметрів, матеріалу і геометрії ріжучого інструменту для забезпечення мінімальних енергетичних витрат технологічного обладнання попереднього подрібнення зношених шин.

#### Матеріали дослідження

В результаті проведеної роботи була отримана квадратична математична модель формування сил різання в процесі обробки різанням зношеної шини, яка складається з двох рівнянь регресії (1) та (2), відповідно для сил  $P_z$  і  $P_y$ :

$$\begin{aligned}
 P_z = & 1053,22571 - 12,94811 \cdot \text{HRA} - 595,81317 \cdot S_p + \\
 & + 5,51321 \cdot \alpha - 14,76805 \cdot \varepsilon - 0,08923 \cdot n + \\
 & + 12,47315 \cdot S_p \cdot \alpha + 8,64754 \cdot S_p \cdot \varepsilon - \\
 & - 0,61847 \cdot S_p \cdot n + 0,00124 \cdot \alpha \cdot \varepsilon - 0,01086 \cdot \alpha \cdot n - \\
 & - 0,00089 \cdot \varepsilon \cdot n + 9,92229 \cdot \text{HRA} \cdot S_p + \\
 & + 0,0483 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha + 0,02266 \cdot \text{HRA} \cdot \varepsilon + \\
 & + 0,00035 \cdot \text{HRA} \cdot n - 0,64906 \cdot \text{HRA} \cdot S_p \cdot \alpha - \\
 & - 0,17842 \cdot \text{HRA} \cdot S_p \cdot \varepsilon + 0,001 \cdot \text{HRA} \cdot S_p \cdot n - \\
 & - 0,00121 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha \cdot \varepsilon + 0,00004 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha \cdot n - \\
 & - 0,00001 \cdot \text{HRA} \cdot \varepsilon \cdot n - 0,18637 \cdot S_p \cdot \alpha \cdot \varepsilon + \\
 & + 0,00693 \cdot S_p \cdot \varepsilon \cdot n + 0,00011 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot n + \\
 & + 0,04049 \cdot S_p \cdot \alpha \cdot n - 0,00058 \cdot S_p \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot n + \\
 & + 0,0093 \cdot \text{HRA} \cdot S_p \cdot \alpha \cdot \varepsilon + 0,07148 \cdot \text{HRA}^2 + \\
 & + 762,22222 \cdot S_p^2 - 0,0984 \cdot \alpha^2 + \\
 & + 0,12431 \cdot \varepsilon^2 + 0,0001 \cdot n^2; \tag{1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_y = & 481,6126 - 2,99736 \cdot \text{HRA} - \\
 & - 6,04416 \cdot S_p - 2,16 \cdot \alpha - 8,07467 \cdot \varepsilon - \\
 & - 0,06393 \cdot n + 0,00024 \cdot \text{HRA} \cdot n - \\
 & - 0,03189 \cdot S_p \cdot n + 0,01497 \cdot \text{HRA}^2 + \\
 & + 82,22222 \cdot S_p^2 + 0,0672 \cdot \alpha^2 + \\
 & + 0,0676 \cdot \varepsilon^2 + 0,00001 \cdot n^2. \tag{2}
 \end{aligned}$$

Створена математична модель виражає залежність сил різання від сукупності геометричних параметрів і твердості матеріалу ріжучого інструменту та режимних параметрів обробки різанням, відповідно. За допомогою математичної моделі 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.

Отримана математична модель у подальшому була використана для оптимізації режимних параметрів процесу розрізання зношених шин навіпіл та вибору оптимальних геометричних параметрів і матеріалу ріжучого інструменту.

Для цього досліджено на екстремум функцію  $P_z$  за змінною  $n$  при фіксованих значеннях  $\alpha = 10$ ,  $\gamma = 10$ ,

$\varepsilon = 45$ , HRA = 64 при різних значеннях  $S_p$ . Отримані за моделлю (1) функції та визначені точки мінімуму частоти обертання шпинделя  $n$  та величини сили  $P_z$  в цих точках наведено у табл. 1.

На рис. 1 зображені графіки досліджених функцій  $P_z(n)$  на екстремум за частотою обертання шпинделя  $n$

Таблиця 1. Результати дослідження на екстремум функції  $P_z(n)$  при фіксованих значеннях HRA,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\alpha$  та певних значеннях  $S_p$

$S_p$	Функція $P_z(n)$	Точка мінімуму $n_{\min}$	Мінімальне значення $P_z(n_{\min})$
0,06	$P_z(n) = 0,0001n^2 - 0,175103n + 202,882$	875,515	126,229
0,1	$P_z(n) = 0,0001n^2 - 0,179052n + 202,072$	895,26	119,923
0,25	$P_z(n) = 0,0001n^2 - 0,19386n + 211,26$	<u>969,3</u>	<u>117,306</u>
0,4	$P_z(n) = 0,0001n^2 - 0,208668n + 256,749$	1043	147,893
0,6	$P_z(n) = 0,0001n^2 - 0,228412n + 370,755$	1142	240,325

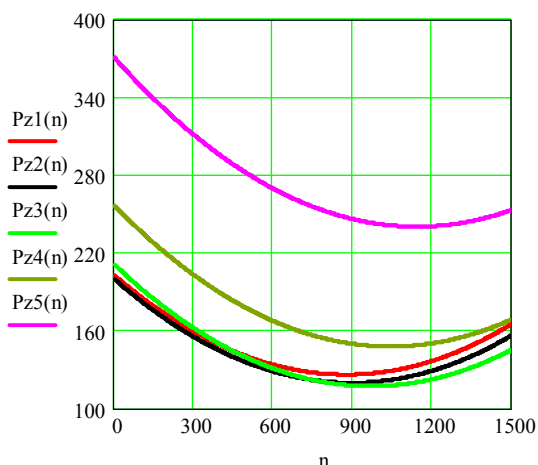


Рис. 1. Графіки досліджених функцій  $P_z(n)$  на екстремум за частотою обертання шпинделя  $n$

Визначено точку мінімуму  $n_{\min} = 969,3$  об/хв при подачі ріжучого інструменту 0,25 мм/об. Згідно табл. 1 уточнюємо, що точка мінімуму відповідає частоті 1000 об/хв.

За математичною моделлю (1) визначена функція залежності  $P_z$  від кута при вершині —  $\varepsilon$  ріжучого інструменту при різних значеннях твердості HRA та фіксованих величинах  $\alpha = 10$ ,  $\gamma = 20$ ,  $S_p = 0,25$  мм/об,  $n = 1000$  об/хв та виконане її дослідження на екстремум. Отримані для певних значень твердості HRA функції та їх точки мінімуму та величини сили  $P_z$  в цих точках представлені в табл. 2.

Точка мінімуму  $\varepsilon_{\min} = 53,254^\circ$  при HRA = 77. Отже дана точка мінімуму відповідає  $\varepsilon = 53^\circ$ . На рис. 2 зображені графіки досліджених на екстремум за  $\varepsilon$  функцій  $P_z(\varepsilon)$ .

Таблиця 2. Результати дослідження на екстремум функції  $P_z(\varepsilon)$  при фіксованих значеннях  $n$ ,  $S_p$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  та певних значеннях твердості HRA

HRA	Функція $P_z(\varepsilon)$	Точка мінімуму $\varepsilon_{\min}$	Мінімальне значення $P_z(\varepsilon_{\min})$
38	$P_z(\varepsilon) = 012431\varepsilon^2 - 12,901\varepsilon + 577,308$	51,89	242,589
64	$P_z(\varepsilon) = 012431\varepsilon^2 - 13,127\varepsilon + 491,086$	52,799	144,537
77	$P_z(\varepsilon) = 012431\varepsilon^2 - 13,24\varepsilon + 484,215$	<u>53,254</u>	<u>131,674</u>
90	$P_z(\varepsilon) = 012431\varepsilon^2 - 13,353\varepsilon + 501,505$	53,708	142,92
144	$P_z(\varepsilon) = 012431\varepsilon^2 - 13,822\varepsilon + 831,938$	55,595	447,722

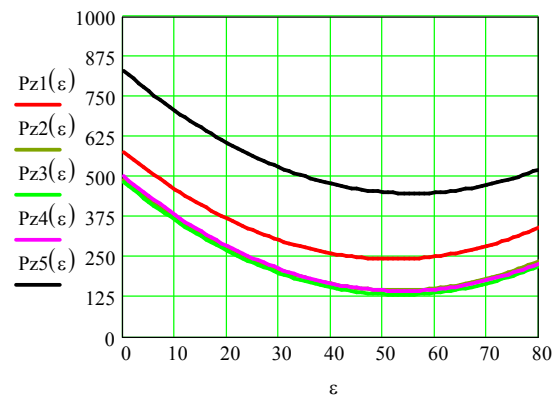


Рис. 2. Графіки досліджених на екстремум за  $\varepsilon$  функцій  $P_z(\varepsilon)$

Визначено функцію сили  $P_z$  в залежності від кута —  $\alpha$  при різних значеннях твердості HRA та при фіксованих значеннях  $n = 1000$  об/хв,  $S_p = 0,25$  мм/об та кутах  $\gamma = 20^\circ$ ,  $\varepsilon = 60^\circ$  та досліджено її на екстремум. Дана функція має точку максимуму. Отримані функції при певних значеннях HRA, їх точки екстремуму та максимальні значення  $P_z$  в точках екстремуму наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Результати дослідження на екстремум функції  $P_z(\alpha)$  при фіксованих значеннях  $n$ ,  $S_p$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$  та певних значеннях твердості HRA

HRA	Функція $P_z(\alpha)$	Точка максимуму $\alpha_{\max}$	Максимальне значення $P_z(\alpha_{\max})$
38	$P_z(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,664\alpha + 205,176$	51,89	679,528
64	$P_z(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,481\alpha + 88,351$	68,501	550,082
77	$P_z(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,389\alpha + 66,178$	68,034	679,336
90	$P_z(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,297\alpha + 68,106$	67,566	679,186
144	$P_z(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,915\alpha + 335,039$	65,625	678,103

На рис. 3 зображені графіки досліджених на екстремум за  $\alpha$  функцій  $P_z(\alpha)$ .

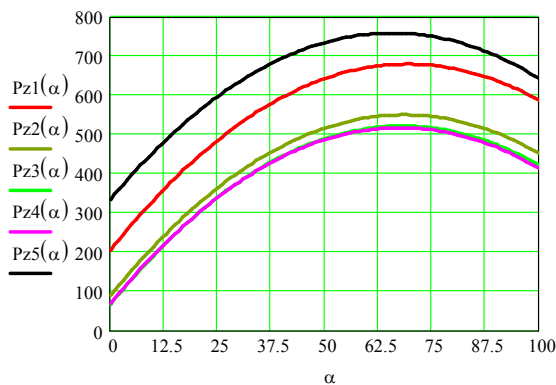


Рис. 3. Графіки досліджених на екстремум за  $\alpha$  функцій  $P_z(\alpha)$

Для максимальної енергоефективної обробки різанням зношених пневматичних шин необхідно проводити обробку з режимними параметрами: частота обертання шпинделя  $n = 1000$  об/хв, подача ріжучого інструменту  $S_p = 0,25$  мм/об. Ріжучий інструментом, виготовлений із матеріалу твердістю HRA = 77 з геометричними параметрами: передній кут  $\gamma = 20^\circ$ , кут при вершині  $\varepsilon = 53^\circ$ , задній кут  $\alpha = 68^\circ$ . Але слід враховувати, що всі ці параметри будуть оптимальними лише за умови різання шин з матеріалом та конструкцією, аналогічними шином Bridgestone 7.1/11.0-5. Для знаходження оптимальних параметрів обробки інших типів шин необхідно визначити та ввести у рівняння регресії корегувальні коефіцієнти, які враховують міцність матеріалу для різних типів шин.

Перш за все, для того, щоб провести розрахунки з визначення корегувальних коефіцієнтів які враховують міцність матеріалу для різних типів шин, необхідно визначитися з критерієм, який буде визначати зміну сил різання на величину, пропорційну досліджуемому коефіцієнту. У ролі даного критерію було обрано межу міцності при розтягуванні —  $\sigma_p$ , МПа.

Для визначення межі міцності матеріалу, з якого виготовлені шини, які досліджувалися, було використано розривну машину УПМ РИИЖТ. Для розривання були використані зразки розміром 30×120 мм товщиною 7 мм. Результати досліджень наведені у табл. 4.

Позначимо коефіцієнт корегування як  $K_\sigma$ , а межу міцності шин Bridgestone 7.1/11.0-5, на яких проводилися досліди з отриманням даних для математичної моделі —  $\sigma_{\text{мод}}$ .

Виразимо коефіцієнти корекції через значення меж міцності шин. Формула визначення коефіцієнту корекції для різних шин отримає вигляд:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{\text{ршин}}}{\sigma_{\text{рмод}}}, \quad (3)$$

де  $\sigma_{\text{ршин}}$  — межа міцності на розрив матеріалу типу шини, для якої визначається коефіцієнт.

Для шин Bridgestone 7.1/11.0-5  $K_\sigma$ , відповідно, дорівнює 1.

Для підтвердження валідності впливу корегувальних коефіцієнтів були проведені додаткові експери-

ментальні дослідження з визначення сил різання. У якості дослідних зразків, були обрано шини: Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (літні) та Michelin XDW ice grip green 315/70R22.5 (зимні). Результати досліджень з визначення сил при розрізанні шин, межі міцності та корегувальні коефіцієнти наведені у табл. 5.

Таблиця 4. Результати досліджень з визначення міцності матеріалів різних шин

Найменування шини	Товщина шини (без протектору), мм	Межа міцності — $\sigma_p$ , МПа
Bridgestone 7.1/11.0-5 (картингові)	7	4,6
Vega 7.1/11.0-5 (картингові)	7	4
Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (літні)	10	22
Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (зимні)	10	27
Michelin X MultiWay 3D XDE 315/70R22.5 (всесезонні)	16	115
Michelin XDW ice grip green 315/70R22.5 (зимні)	16	121

Таблиця 5. Результати досліджень з визначення сил при розрізанні шин, межі міцності та корегувальні коефіцієнти

Найменування шини	Межа міцності — $\sigma_p$ , МПа	Сила різання — $P_z$ , Н	Корегувальний коефіцієнт — $K_\sigma$ рівняння регресії
Bridgestone 7.1/11.0-5 (картингові)	4,6	14	1,000
Vega 7.1/11.0-5 (картингові)	4	12	0,869
Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (літні)	22	69	4,783
Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (зимні)	27	82	5,869
Michelin X MultiWay 3D XDE 315/70R22.5 (всесезонні)	115	350	25,000
Michelin XDW ice grip green 315/70R22.5 (зимні)	121	365	26,300

Залежність сил різання від межі міцності матеріалів різних шин описується рівнянням:

$$y = 3,0264x + 0,4068. \quad (4)$$

Підставивши у рівняння (4) замість  $x$  межу міцності на розрив матеріалу шини  $\sigma_{\text{ршин}}$ , отримали рів-

няння залежностей сил різання від межі міцності матеріалів різних шин:

$$y = 3,0264 \cdot \sigma_{\text{шин}} + 0,4068. \quad (5)$$

Рівняння регресії (1) з урахуванням рівняння залежності сили різання від межі міцності матеріалів різних шин (5) набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned} P_z = & 0,0000403 \cdot n^2 + 0,0505698 \cdot \varepsilon^2 + 0,0290778 \cdot \text{HRA}^2 + \\ & + 310,072 \cdot S^2 - 0,0400291 \cdot \alpha^2 + 0,2163249 \cdot \text{HRA}^2 \cdot \sigma + \\ & + 2306,7893333 \cdot S^2 \cdot \sigma - 0,2977978 \cdot \alpha^2 \cdot \sigma + \\ & + 0,3762151 \cdot \sigma \cdot \varepsilon^2 + 0,0003 \cdot \sigma \cdot n^2 - 5,2672918 \cdot \text{HRA} - \\ & - 242,3767976 \cdot S + 2,2427734 \cdot \alpha + 3187,482288 \cdot \sigma - \\ & - 6,0076408 \cdot \varepsilon - 0,0362999 \cdot n + 4,036389 \cdot \text{HRA} \cdot S + \\ & + 0,0196499 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha - 39,1861647 \cdot \text{HRA} \cdot \sigma + \\ & + 0,0092188 \cdot \text{HRA} \cdot \varepsilon + 5,0740781 \cdot S \cdot \alpha - \\ & - 1803,168978 \cdot S \cdot \sigma + 3,5178199 \cdot S \cdot \varepsilon + \\ & + 0,0001407 \cdot \text{HRA} \cdot n - 0,2515932 \cdot S \cdot n + \\ & + 16,6851752 \cdot \alpha \cdot \varepsilon - 44,6940123 \cdot \sigma \cdot \varepsilon - \\ & - 0,0044167 \cdot \alpha \cdot n - 0,2700543 \cdot \sigma \cdot n - 0,0003627 \cdot \varepsilon \cdot n + \\ & + 37,7487464 \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma - 0,0758154 \cdot S \cdot \alpha \cdot \varepsilon + \\ & + 26,1709194 \cdot S \cdot \sigma \cdot \varepsilon + 0,0000175 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha \cdot n + \\ & + 0,0010464 \cdot \text{HRA} \cdot \sigma \cdot n - 0,0000039 \cdot \text{HRA} \cdot \varepsilon \cdot n + \\ & + 0,0164698 \cdot S \cdot \alpha \cdot n - 1,8717344 \cdot S \cdot \sigma \cdot n + \\ & + 0,0028187 \cdot S \cdot \varepsilon \cdot n + 0,0037561 \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \varepsilon - \\ & - 0,0328581 \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot n + 0,0000453 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot n - \\ & - 0,002698 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot n - 0,2640395 \cdot \text{HRA} \cdot S \cdot \alpha + \\ & + 30,0288288 \cdot \text{HRA} \cdot S \cdot \varepsilon + 0,0004061 \cdot \text{HRA} \cdot S \cdot n + \\ & + 0,1461858 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha \cdot \sigma - 0,0004909 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha \cdot \varepsilon + \\ & + 0,0685837 \cdot \text{HRA} \cdot \sigma \cdot \varepsilon - 1,964329 \cdot \text{HRA} \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma + \\ & + 0,0037818 \cdot \text{HRA} \cdot S \cdot \alpha \cdot \varepsilon - 0,5399703 \cdot \text{HRA} \cdot S \cdot \sigma \cdot n - \\ & - 0,0036522 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \varepsilon - 0,5640308 \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \varepsilon + \\ & + 0,0001304 \cdot \text{HRA} \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot n - 0,0000288 \cdot \text{HRA} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot n + \\ & + 0,1225278 \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot n - 0,0002379 \cdot S \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot n + \\ & + 0,0209696 \cdot S \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot n + 0,0003369 \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot n + \\ & + 0,0281346 \cdot \text{HRA} \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \varepsilon - \\ & - 0,0017695 \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot n + 428,4522187. \quad (6) \end{aligned}$$

Для підтвердження адекватності рівняння (6) було проведено оцінку однорідності дисперсій розрахункових та експериментальних значень сил при розрізанні шин за допомогою статистичного критерію Фішера.

Заключним етапом роботи виступає проведення оцінки енерговитрат на процес розрізання шин до і після оптимізації.

Ефективна потужність різання визначається за формулою:

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}, \quad (7)$$

де  $v$  — швидкість різання, визначається за формулою:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (8)$$

де  $D$  — зовнішній діаметр шини, що розрізається;  $n$  — частота обертання шпинделя станка.

Використовуючи формули (7) та (8), проведемо розрахунок ефективної потужності різання для обраних

режимів до і після оптимізації для шин: Bridgestone 7.1/11.0-5 (картингові), Vega 7.1/11.0-5 (картингові), Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (літні), Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (зимні), Michelin X MultiWay 3D XDE 315/70R22.5 (всесезонні), Michelin XDW ice grip green 315/70R22.5 (зимні). Результати розрахунків приведені у таблиці 6.

Таблиця 6. Порівняння енерговитрат при процесі різання зношених шин

Найменування шини	Енерговитрати до оптимізації – $N_e$ , кВт	Енерговитрати після оптимізації – $N_e$ , кВт
Bridgestone 7.1/11.0-5 (картингові)	0,20	0,16
Vega 7.1/11.0-5 (картингові)	0,17	0,16
Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (літні)	1,35	1,05
Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 (зимні)	1,60	1,25
Michelin X MultiWay 3D XDE 315/70R22.5 (всесезонні)	10,04	7,53
Michelin XDW ice grip green 315/70R22.5 (зимні)	10,47	7,85

#### Результати дослідження та їх обговорення

В результаті проведених досліджень запропоновано спосіб подолання труднощів, які описані в роботі [5] та виникають під час технологічного процесу утилізації зношених шин. Для цього отримана квадратична математична модель, яка визначає сили різання в процесі подрібнення зношених автомобільних шин і складається з двох рівнянь регресії для розрахунку сил  $P_z$  і  $P_y$ .

Вона дозволяє обґрунтовано провести оптимізацію режимних параметрів процесу обробки різанням зношених автомобільних пневматичних шин, а саме геометричних параметрів ріжучого інструменту. Вибрати оптимальний матеріал ріжучого інструменту, що забезпечує мінімальні енергетичні витрати. Визначити корегувальні коефіцієнти рівнянь регресії для різних типів шин. Зокрема, може бути забезпечено мінімізацію сил різання, а отже, і зменшення енерговитрат технологічного обладнання під час процесу подрібнення зношених пневматичних шин. Мінімальні значення сил  $P_z$  знаходяться у діапазоні величин частоти обертання шпинделя 900—1100 об/хв при подачі ріжучого інструменту 0,25 мм/об.

Для максимальної енергоефективної обробки різанням зношених пневматичних шин необхідно проводити обробку ріжучим інструментом, виготовленим із матеріалу твердістю  $\text{HRA} = 77$  з геометричними параметрами:  $\gamma = 20^\circ$ ,  $\varepsilon = 53^\circ$ ,  $\alpha = 68^\circ$  та частоті обертання шпинделя  $n = 1000$  об/хв і подачі ріжучого інструменту  $S_p = 0,25$  мм/об.

Передній кут  $\gamma$  ріжучого інструменту істотно не впливає на формування сили різання  $P_z$ , але забезпечує її мінімальне значення при  $\gamma = 20^\circ$ .

Недоліком роботи можна вважати те, що результати дослідження найбільш точно відповідають шинам з посадковим діаметром від 11 до 22,5 дюймів. Для отримання режимних параметрів процесу розрізання навіпіл шин більшого діаметру, в тому числі великогабаритних, необхідно проведення додаткових досліджень.

Прикладним аспектом використання отриманого наукового результату є вдосконалення типового технологічного процесу утилізації зношених пневматичних шин, який описаний у роботі [4].

Отримані результати дають можливість продовження теоретичних та експериментальних досліджень процесу попереднього подрібнення зношених шин, а саме вирізання бортових кілець.

#### Висновки

1. Отримано квадратичну математичну модель для визначення сил різання в процесі розрізання навіпіл зношених автомобільних шин Bridgestone 7.1/11.0-5, яка складається з двох рівнянь регресії для визначення сил  $P_z$  і  $P_y$ .

2. Отримані та введені у рівняння регресії для визначення сил  $P_z$  і  $P_y$  корегувальні коефіцієнти, що враховують міцність матеріалу, з якого виготовлена шина, для визначення ефективних параметрів процесу розрізання інших від шин Bridgestone 7.1/11.0-5 типів.

3. Визначені ефективні режимні параметри процесу розрізання зношених шин навіпіл, які забезпечують мінімальні енергетичні витрати: частота обертання шпинделя  $n = 1000$  об/хв, подача ріжучого інструменту  $S_p = 0,25$  мм/об.

4. Визначено ефективну твердість матеріалу ріжучого інструменту ( $HRA = 77$ ), який використовується для розрізання зношених шин навіпіл і забезпечує мінімальні енергетичні витрати.

5. Визначено ефективні геометричні параметри ріжучого інструменту: передній кут  $\gamma = 20^\circ$ , кут при вершині  $\varepsilon = 53^\circ$ , задній кут  $\alpha = 68^\circ$ , які забезпечують мінімальні енергетичні витрати процесу різання.

6. Для максимальної енергоефективності процесу різання зношених пневматичних шин необхідно здійснювати обробку ріжучим інструментом, виготовленим із матеріалу твердістю  $HRA = 77$  з геометричними параметрами:  $\gamma = 20^\circ$ ,  $\varepsilon = 53^\circ$ ,  $\alpha = 68^\circ$  та частоті обертання шпинделя  $n = 1000$  об/хв і подачі ріжучого інструменту  $S_p = 0,25$  мм/об.

7. Оптимізація процесу різання зношених пневматичних привела до економії енергетичних витрат до 20 %.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Аналіз регуляторного впливу до проекту наказу Міністерства екології та природних ресурсів «Про встановлення Мінімальних розмірів плати за послуги з організації збирання, заготівлі та утилізації зношених

шин» [Електронний ресурс]. – Міністерство екології та природних ресурсів України. – Режим доступу: [http://old.menr.gov.ua/docs/normbaza/regulatory/analiz-rehuliatornoho-vplyvu/arv\\_21032013.doc](http://old.menr.gov.ua/docs/normbaza/regulatory/analiz-rehuliatornoho-vplyvu/arv_21032013.doc).

- Сметанін, В. І. Захист навколишнього середовища від відходів виробництва й споживання [Текст]: навч. пос. / В. І. Сметанін. – М.: Колосся, 2000. – 232 с.
- Постников, В. В. Процессы на контактных поверхностях, износ режущего инструмента, свойства обработанной поверхности [Текст] / В. В. Постников, Б. У. Шарипов, Л. Ш. Шустер. – Свердловск: Изд-во Уральского университета, 1988. – 224 с.
- Пат. № 56698 UA. Спосіб переробки зношених шин загального призначення та великогабаритних автомобільних шин [Текст] / Скорняков Е. С., Коробочка О. М., Сасов О. О., Авер'янов В. С.; власник – Дніпродзержинський державний технічний університет. – № у 2010 08087; заяв. 29.06.2010; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.
- Козарь, Д. М. Кинематика и динамика формирования сил резания при фрезеровании упругой оболочки [Текст] / Д. М. Козарь, П. Я. Крауиньш // Наука и образование. – 2013. – № 7. – С. 287–309.
- Музафаров, Р. С. Исследование влияния угла заточки лезвия на усилие резания [Текст] / Р. С. Музафаров, А. Ф. Мкртчян // Интеллектуальные системы в производстве. – 2008. – № 2 (12). – С. 85–88.
- Сасов, О. О. Експериментальні дослідження впливу геометрії ріжучого інструмента з титанвольфрамових сплавів на сили різання при розрізанні зношених пневматичних шин [Текст] / О. О. Сасов, Ю. А. Коржавін, С. Ю. Сичов // Перспективні технології та прилади. – 2016. – № 8 (1). – С. 110–115.
- Сасов, О. О. Дослідження впливу геометрії та матеріалу ріжучого інструменту на сили різання при попередньому подрібненні зношених пневматичних шин [Текст] / О. О. Сасов, Ю. А. Коржавін, О. М. Коробочка // Перспективні технології та прилади. – 2015. – № 7 (2). – С. 104–107.
- Скорняков, Е. С. Дослідження особливостей подрібнення різанням пневматичних шин при утилізації [Текст] / Е. С. Скорняков, О. О. Сасов, Ю. А. Коржавін та ін. // Перспективні технології та прилади. – 2015. – № 6 (1). – С. 83–87.
- Рагрин, Н. А. Особенности планирования эксперимента в исследованиях стойкости режущих инструментов [Текст] / Н. А. Рагрин // Современные проблемы теории машин. – 2016. – № 4. – С. 12–13.
- Грубый, С. В. Оптимизация режимов одноинструментной лезвийной обработки [Текст] / С. В. Грубый // Научно технический журнал СТИН. – 2008. – № 2. – С. 24–26.
- Грубый, С. В. Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов [Текст] / С. В. Грубый // Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2017. – № 1. – С. 25–37.

пост. 02.11.2017