

Проведені дослідження процесу обробки різанням зношених пневматичних шин ріжучим інструментом зі сплавів марок Р6М5 і Т15К6. Отримана математична модель формування сил різання при розрізання пневматичних шин навпіл. Визначено ефективні режимні параметри: частота обертання шпинделя верстата і подача ріжучого інструменту, геометричні параметри і твердість матеріалу ріжучого інструменту, які забезпечують мінімальні енерговитрати

Ключові слова: розрізання шин, ріжучий інструмент, сили різання, математична модель, енергоефективність, оптимізація

Проведены исследования процесса обработки резанием изношенных пневматических шин режущим инструментом из сплавов марок Р6М5 и Т15К6. Полученная математическая модель формирования сил резания при резки пневматических шин пополам. Определены эффективные режимные параметры: частота вращения шпинделя станка и подача режущего инструмента, геометрические параметры и твердость материала режущего инструмента, которые обеспечивают минимальные энергозатраты

Ключевые слова: разрезание шин, режущий инструмент, силы резания, математическая модель, энергоэффективность, оптимизация

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ЗНОШЕНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН

О. О. Сасов

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: sasov@ukr.net

О. М. Коробочка

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: ekorobochra@ukr.net

В. С. Авер'янов

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: averynov@ukr.net

Ю. А. Коржавін

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: korzhavin_ua@ukr.net

*Кафедра автомобілів та автомобільного господарства
Дніпровський державний технічний університет
вул. Дніпробудівська, 2, м. Кам'янське, Україна, 51918

1. Вступ

На сьогоднішній день зберігання та утилізація зношених автомобільних шин є гострою проблемою усіх розвинутих країн світу. За статистикою на європейські країни припадає три мільярди зношених автомобільних шин (це близько двох мільйонів тон). З цієї кількості тільки 23 % покришок знаходять застосування (експорт в інші країни, спалювання з метою отримання енергії, механічне подрібнення для покриття доріг, спортмайданчиків та інше). Інші 77 % зношених шин, які залишилися, не використовуються через відсутність рентабельного способу утилізації.

За даними Державного автотранспортного науково-дослідного і проектного інституту України, 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].

В процесі утилізації шини розділяються по групах, очищуються, розрізаються на частини, подрібнюються (в залежності від методу), відбувається розділення гумової крихти від металевго корду та текстилю.

Механічне подрібнення різанням зношених автомобільних шин з різною жорсткістю гуми, пов'язане з відомими труднощами [3], обумовленими пружними властивостями гуми, а також багатошаровістю 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 технологічного 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.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

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. Рівнодіючи P 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 навіпів 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 прогнути 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 в кВт. 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]. Зі збільшенням подачі і глибини різання збільшується площа поперечного перетину шару гуми і об'єм матеріалу, що деформується. Це призводить до більшого опору матеріалу і процес різання відбувається з більшими силами різання. При більшій подачі зростає обсяг деформацій, але ширина зрізу залишається попередньою, тобто сили нормального тиску і тертя не змінюються. Отже, подача менше впливає на сили різання ніж глибина різання [6–8].

Швидкість різання при обробці пневматичних шин – це один з основних факторів, який визначає продуктивність процесу різання. Із збільшенням швидкості різання зростає продуктивність обробки, але швидше спрацьовується інструмент і збільшуються зв'язані з цим затрати. 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 γ 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 взаємовпливаючих 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 [11–13]. Саме цим можна пояснити невелику кількість публікацій [11–20], присвячених цьому питанню, та неоднозначність висновків, що обумовлюють необхідність проведення подальших досліджень в цьому напрямку.

3. Ціль та задачі дослідження

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

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- отримати математичну модель формування сил різання під час розрізання зношених пневматичних шин навіпів;
- визначити корегувальні коефіцієнти, які враховують міцність матеріалу для різних типів шин для забезпечення адекватності математичної моделі.

4. Матеріали та методи дослідження енергоефективності процесу розрізання зношених шин навіпів

На першому етапі роботи за допомогою САПР КОМАС-3D V16 була створена схема розташування приведених сил різання по координатних осях (рис. 1) під час процесу розрізання автомобільної шини навіпів. В даному випадку, в процесі різання відсутня поздовжня подача, тож можна вважати, що усі сили діють в одній площині. Було обрано шість вхідних факторів – кутів ріжучого інструменту: γ , ϵ , α ; твердість ріжучого інструменту HRA; режимні параметри процесу різання: n , S_p , та два вихідних фактори: сили різання P_z та P_y .

На другому етапі значення цих 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:

$$x_i = \frac{c_i - c_{0i}}{\Delta c}, \quad (1)$$

де x_i – кодоване значення фактору (безрозмірна величина); $c_i - c_{0i}$ – натуральне значення фактору (відповідно поточне і на нульовому рівні); Δc – натуральне значення інтервалу варіювання [10].

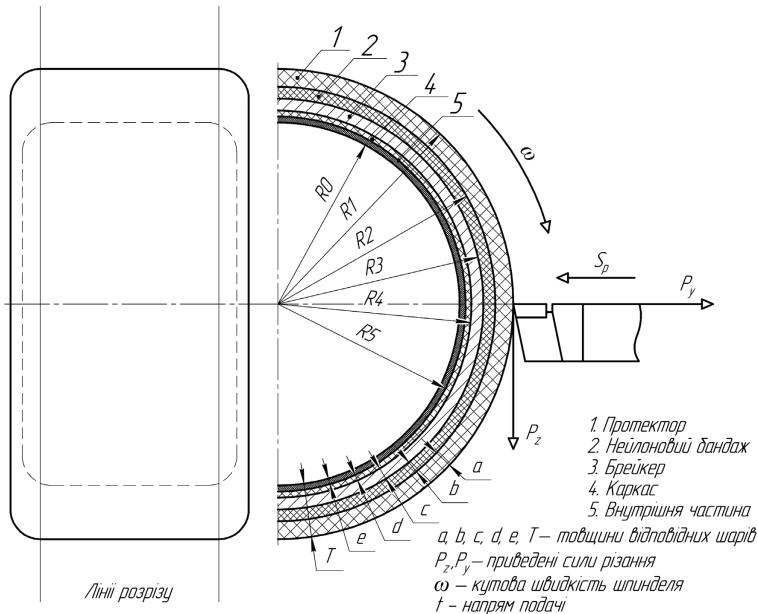


Рис. 1. Схема розташування приведених сил різання P_z та P_y по координатних осях

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

Величина плеча α «зіркових» точок визначалися за формулою:

$$\alpha = \sqrt{\frac{n \cdot \varphi - 2^k}{2}},$$

де

$$\varphi = \sqrt{\frac{2^k}{n}}; \quad n = 2^k + 2k + 1, \quad (2)$$

але, так як при розрахунковій величині α нижні рівні варіювання деяких параметрів не відповідають фізичним можливостям обладнання, то були обрані інші табличні значення $\alpha = 1,596$ та $\varphi = 0,863$ [10, 21].

На третьому етапі створено матрицю планування повного факторного експерименту. За умови наявності шести вхідних факторів (γ , ϵ , α , HRA, n , S_p) у якості ядра був використаний повний факторний експеримент, кількість дослідів у ядрі $2^k = 64$, у «зіркових» точках – $2k = 12$, у центрі плану – 1. 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 [10, 21]. У «зіркових» точках значення усіх факторів, окрім фактору з плечем α , залишаються на нульовому рівні. В центральній точці плану значення усіх факторів на нульовому рівні. Варіанти взаємодії факторів між собою були знайдені перебором. 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.

На четвертому етапі було проведено експериментальне дослідження згідно плану за допомогою комплексу вимірювального обладнання. Вимірювальний комплекс складався з вимірювальної головки УДМ-100, міліамперметра та підсилювача ТА-5, та експериментальної установка на

базі токарно-гвинторізного верстата 16К20 [9]. В якості різучого 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 (рис. 3), 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 навіпіл 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 [8].

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

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

Перевірка рівної точності вимірів (однорідності ряду оцінок дисперсій $S_{y1}^2, S_{y2}^2, \dots, S_{yN1}^2$) виконується за допомогою Критерію Кохрена (G -статистики).

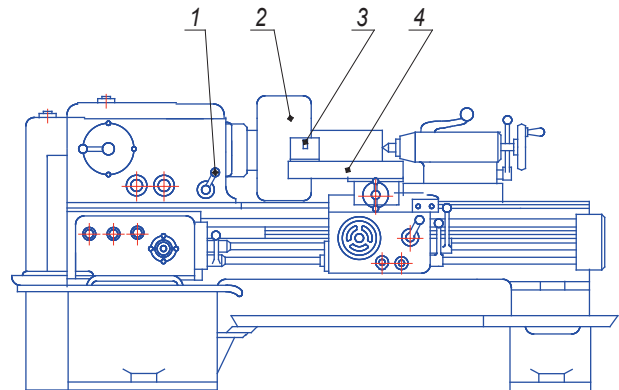


Рис. 2. Схема експериментальної установки для подрібнення шин різанням: 1 – токарно-гвинторізний верстат 16К20; 2 – пневматична шина; 3 – вимірювальна голівка УДМ-100 з різцем; 4 – перехідна консоль



Рис. 3. Вимірювальна голівка УДМ-100 з різцем

На шостому етапі, після аналізу отриманих експериментальних даних, були розраховані коефіцієнти регресії та проведена оцінка значимості.

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

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n y_u}{n}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}; \quad (3)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^n (x_{iu} x_{ju})}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n (x'_{iu})^2 \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^n [(x'_{iu})^2]}; \quad (4)$$

де i, j – номери стовбців матриці планування; x_{iu} – елементи i -го стовбця; x_{ju} – елементи j -го стовбця; y_u – значення відгуку в u -й точці плану; \bar{y}_u – середнє арифметичне значення відгуку в u -й точці плану; $(x'_{iu})^2$ – квадратична змінна [10].

Перевірка значимості коефіцієнтів рівняння регресії проведена за допомогою t -критерію Стьюдента [21].

На сьомому етапі були побудовані рівняння регресії при ортогональному центральному композиційному плануванні другого порядку з урахуванням значимості коефіцієнтів рівняння регресії та умови заковданості факторів, для кожної з сил – P_z та P_y у вигляді:

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

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

Ефективна потужність різання визначається за формулою [22]:

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

де v – швидкість різання, визначається за формулою:

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

де D – зовнішній діаметр шпинделя станка, що розрізається; n – частота обертання шпинделя станка.

Надалі будемо вважати, що для вирішення задачі оптимізації енерговитрат під час процесу різання шпиндетною є сила P_z .

На восьмому етапі проводили оптимізацію режимних параметрів процесу різання, а саме частоти обертання шпинделя верстата – n в діапазоні 160–1600 об/хв при подачах – S_p в діапазоні 0,06–0,6 мм/об і постійних значеннях твердості (HRA 64) та кутів ($\gamma=10^\circ$, $\varepsilon=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$). Для цього використовуючи рівняння (5) будували таблицю оптимізації частоти обертання шпинделя при різних подачах та постійних значеннях твердості і геометричних параметрах ріжучого інструменту (табл. 1).

На дев'ятому етапі проводили оптимізацію геометричних параметрів ріжучого інструменту при п'яти значеннях твердості: HRA 38, 64, 77, 90, 144. Для цього будували таблицю оптимізації переднього кута – γ при різних значеннях твердості, постійних режимних параметрах (n, S_p) та кутах $\varepsilon=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$ (табл. 2).

На третьому етапі будували таблицю оптимізації кута при вершині – ε при різних значеннях твердості, постійних режимних параметрах (n, S_p) та кутах $\gamma=20^\circ$, $\alpha=10^\circ$ (табл. 3).

Побудуємо таблицю оптимізації заднього кута – α при різних значеннях твердості, постійних режимних параметрах (n, S_p) та кутах $\gamma=20^\circ$, $\varepsilon=60^\circ$ (табл. 4).

Таблиця 1

Оптимізація частоти обертання шпинделя – n при різних подачах – S_p та постійних значеннях твердості (HRA 64) і геометричних параметрах ріжучого інструменту ($\gamma=10^\circ$, $\varepsilon=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$) (скорочена)

Частота обертання шпинделя, n , об/хв	Подача, S_p , мм/об	Твердість матеріалу ріжучого інструменту, HRA	Передній кут ріжучого інструменту, γ , град.	Кут при вершині, ε , град.	Задній кут, α , град.	Сила різання P_z , Н
160	0,06	64	10	45	10	146
250	0,06	64	10	45	10	116
630	0,06	64	10	45	10	84
1000	0,06	64	10	45	10	80
1600	0,06	64	10	45	10	92

Таблица 2

Оптимізація переднього кута – γ при різних значеннях твердості, постійних режимних параметрах ($n = 1000$ об/хв, $S_p = 0,25$ мм/об) та кутах $\varepsilon = 45^\circ$, $\alpha = 10^\circ$ (скорочена)

Частота обертання шпинделя, n , об/хв	Подача, S_p , мм/об	Твердість матеріалу ріжучого інструменту, HRA	Передній кут ріжучого інструменту, γ , град.	Кут при вершині, ε , град.	Задній кут, α , град.	Сила різання P_z , Н
1000	0,25	38	6	45	10	89
1000	0,25	38	10	45	10	85
1000	0,25	38	20	45	10	85
1000	0,25	38	30	45	10	92
1000	0,25	38	48	45	10	99
...
1000	0,25	144	48	45	10	58

Таблица 3

Оптимізація кута при вершині – ε при різних значеннях твердості, постійних режимних параметрах ($n = 1000$ об/хв, $S_p = 0,25$ мм/об) та кутах $\gamma = 20^\circ$, $\alpha = 10^\circ$ (скорочена)

Частота обертання шпинделя, n , об/хв	Подача, S_p , мм/об	Твердість матеріалу ріжучого інструменту, HRA	Передній кут ріжучого інструменту, γ , град.	Кут при вершині, ε , град.	Задній кут, α , град.	Сила різання P_z , Н
1000	0,25	38	20	27	10	120
1000	0,25	38	20	45	10	85
1000	0,25	38	20	60	10	70
1000	0,25	38	20	75	10	111
1000	0,25	38	20	120	10	162
1000	0,25	64	20	27	10	95
...
1000	0,25	77	20	27	10	73
...
1000	0,25	90	20	27	10	74
...
1000	0,25	144	20	27	10	86
...
1000	0,25	144	20	120	10	122

Таблица 4

Оптимізація заднього кута – α при різних значеннях твердості, постійних режимних параметрах ($n = 1000$ об/хв, $S_p = 0,25$ мм/об) та кутах $\gamma = 20^\circ$, $\varepsilon = 60^\circ$ (скорочена)

Частота обертання шпинделя, n , об/хв	Подача, S_p , мм/об	Твердість матеріалу ріжучого інструменту, HRA	Передній кут ріжучого інструменту, γ , град.	Кут при вершині, ε , град.	Задній кут, α , град.	Сила різання P_z , Н
1000	0,25	38	20	60	6	67
1000	0,25	38	20	60	10	70
1000	0,25	38	20	60	15	72
1000	0,25	38	20	60	20	69
1000	0,25	38	20	60	34	65
1000	0,25	64	20	60	6	41
...
1000	0,25	77	20	60	6	17
...
1000	0,25	144	20	60	34	26

5. Результати дослідження енергоефективності процесу розрізання зношених шин навпіл під час утилізації

В результаті проведеної роботи була отримана квадратична математична модель формування сил різання в процесі обробки різанням зношеної шини, яка складається з двох рівнянь регресії (5) та (6), відповідно для сил P_z і P_y .

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 навпіл та вибору оптимальних геометричних параметрів і матеріалу ріжучого інструменту.

Для цього досліджено на екстремум функцію P_z за змінною n при фіксованих значеннях $\alpha = 10$, $\gamma = 10$, $\epsilon = 45$, HRA=64 при різних значеннях S_p . Отримані за моделлю (5) функції та визначені точки мінімуму частоти обертання шпинделя n та величини сили P_z в цих точках наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Результати дослідження на екстремум функції $P_z(n)$ при фіксованих значеннях HRA, γ , ϵ , α 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	$P_z(n)=0,0001n^2-0,19386n+211,26$	969,3	117,306
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

На рис. 4 зображені графіки досліджених функцій $P_z(n)$ на екстремум за частотою обертання шпинделя n .

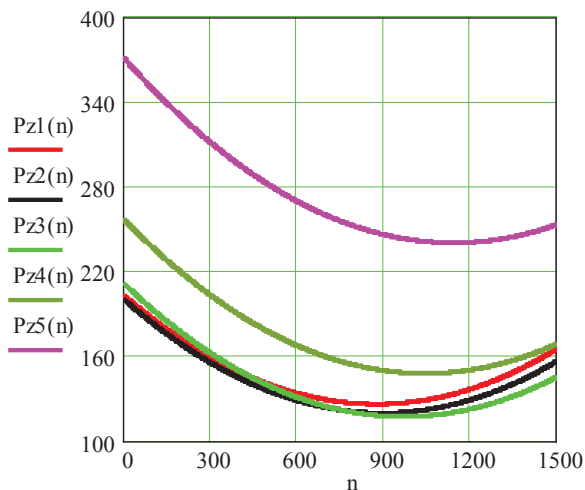


Рис. 4. Графіки досліджених функцій $P_z(n)$ на екстремум за частотою обертання шпинделя n

Визначено точку мінімуму $n_{min}=969,3$ об/хв при подачі ріжучого інструменту 0,25 мм/об. Згідно табл. 5 уточнюємо, що точка мінімуму відповідає частоті 1000 об/хв.

За математичною моделлю (5) визначена функція залежності P_z від кута при вершині – ϵ 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. 6.

Таблиця 6

Результати дослідження на екстремум функції $P_z(\epsilon)$ при фіксованих значеннях n , S_p , γ , α та певних значеннях твердості HRA

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

Точка мінімуму $\epsilon_{min}=53,254^\circ$ при HRA=77. Отже дана точка мінімуму відповідає $\epsilon=53^\circ$. На рис. 5 зображені графіки досліджених на екстремум за ϵ функцій $P_z(\epsilon)$.

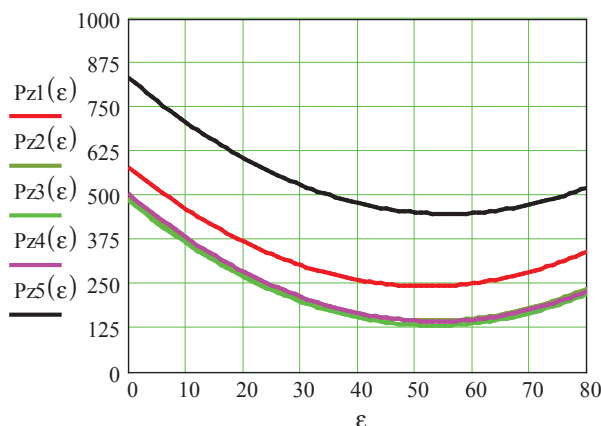


Рис. 5. Графіки досліджених на екстремум за ϵ функцій $P_z(\epsilon)$

Визначено функцію сили P_z в залежності від кута – α при різних значеннях твердості HRA та при фіксованих значеннях $n=1000$ об/хв, $S_p=0,25$ мм/об та кутах $\gamma=20^\circ$, $\epsilon=60^\circ$ 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. 7.

На рис. 6 зображені графіки досліджених на екстремум за α 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 $\epsilon=53^\circ$, задній кут $\alpha=68^\circ$. Але слід враховувати, що всі ці параметри будуть оптимальними лише за умови різання шин з матеріалом та конструкцією, аналогічними шинам 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.

Таблиця 7

Результати дослідження на екстремум функції $P_2(\alpha)$ при фіксованих значеннях n , S_p , γ , ϵ та певних значеннях твердості HRA

HRA	Функція $P_2(\alpha)$	Точка максимуму α_{max}	Максимальне значення $P_2(\alpha_{max})$
38	$P_2(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,664\alpha + 205,176$	51,89	679,528
64	$P_2(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,481\alpha + 88,351$	68,501	550,082
77	$P_2(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,389\alpha + 66,178$	68,034	679,336
90	$P_2(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,297\alpha + 68,106$	67,566	679,186
144	$P_2(\alpha) = -0,0984\alpha^2 + 13,915\alpha + 335,039$	65,625	678,103

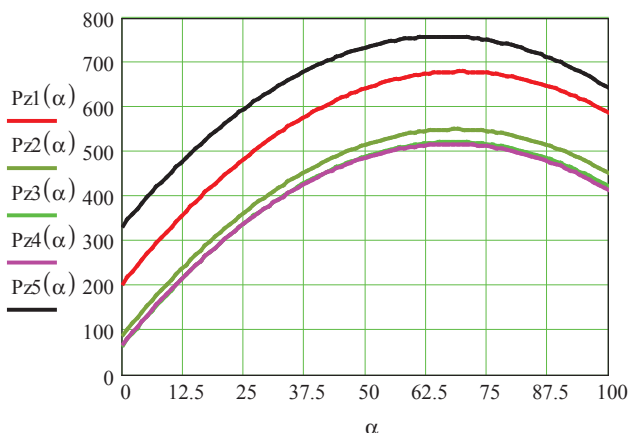


Рис. 6. Графіки досліджених на екстремум за α функцій $P_2(\alpha)$

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 – σ_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. 8.

Позначимо коефіцієнт корегування як K_σ , а межу міцності шин Bridgestone 7.1/11.0-5, на яких проводилися досліді з отриманням даних для математичної моделі – $\sigma_{рмод}$.

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

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{ршинн}}{\sigma_{рмод}}, \tag{9}$$

де $\sigma_{ршинн}$ – межа міцності на розрив матеріалу типу шини, для якої визначається коефіцієнт.

Таблиця 8

Результати досліджень з визначення міцності матеріалів різних шин

Найменування шини	Товщина шини (без протектору), мм	Межа міцності – σ_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

Для шин Bridgestone 7.1/11.0-5 K_σ , відповідно, дорівнює 1.

Для підтвердження валідності впливу корегувальних коефіцієнтів були проведені додаткові експериментальні 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 розриванні шин, межі міцності та корегувальні коефіцієнти наведені у табл. 9.

Таблиця 9

Результати досліджень з визначення сил при розриванні шин, межі міцності та корегувальні коефіцієнти

Найменування шини	Межа міцності – σ_p , МПа	Сила різання – P_z , Н	Коректувальний коефіцієнт – K_σ 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

За допомогою програми Microsoft Excel 2013 будували графік залежностей сил різання від межі міцності

матеріалів різних шин (рис. 7), який описується наступним рівнянням:

$$y = 3,0264x + 0,4068. \quad (10)$$

Підставивши у рівняння (10) замість x межу міцності на розрив матеріалу шини $\sigma_{(ршини)}$, отримали рівняння залежностей сил різання від межі міцності матеріалів різних шин:

$$y = 3,0264 \cdot \sigma_{ршини} + 0,4068. \quad (11)$$

Рівняння регресії (5) з урахуванням рівняння залежностей сили різання від межі міцності матеріалів різних шин (11) набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned} P_z = & 0,0000403 \cdot n^2 + 0,0505698 \cdot \epsilon^2 + \\ & + 0,0290778 \cdot HRA^2 + 310,072 \cdot S^2 - \\ & - 0,0400291 \cdot \alpha^2 + \\ & + 0,2163249 \cdot HRA^2 \cdot \sigma + \\ & + 2306,7893333 \cdot S^2 \cdot \sigma - \\ & - 0,2977978 \cdot \alpha^2 \cdot \sigma + \\ & + 0,3762151 \cdot \sigma \cdot \epsilon^2 + 0,0003 \cdot \sigma \cdot n^2 - \\ & - 5,2672918 \cdot HRA - 242,3767976 \cdot S + \\ & + 2,2427734 \cdot \alpha + 3187,482288 \cdot \sigma - \\ & - 6,0076408 \cdot \epsilon - 0,0362999 \cdot n + 4,036389 \cdot HRA \cdot S + \\ & + 0,0196499 \cdot HRA \cdot \alpha - 39,1861647 \cdot HRA \cdot \sigma + \\ & + 0,0092188 \cdot HRA \cdot \epsilon + 5,0740781 \cdot S \cdot \alpha - \\ & - 1803,168978 \cdot S \cdot \sigma + 3,5178199 \cdot S \cdot \epsilon + \\ & + 0,0001407 \cdot HRA \cdot n - 0,2515932 \cdot S \cdot n + \\ & + 16,6851752 \cdot \alpha \cdot \epsilon - 44,6940123 \cdot \sigma \cdot \epsilon - \\ & - 0,0044167 \cdot \alpha \cdot n - 0,2700543 \cdot \sigma \cdot n - 0,0003627 \cdot \epsilon \cdot n + \\ & + 37,7487464 \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma - 0,0758154 \cdot S \cdot \alpha \cdot \epsilon + \\ & + 26,1709194 \cdot S \cdot \sigma \cdot \epsilon + 0,0000175 \cdot HRA \cdot \alpha \cdot n + \\ & + 0,0010464 \cdot HRA \cdot \sigma \cdot n - 0,0000039 \cdot HRA \cdot \epsilon \cdot n + \\ & + 0,0164698 \cdot S \cdot \alpha \cdot n - 1,8717344 \cdot S \cdot \sigma \cdot n + \\ & + 0,0028187 \cdot S \cdot \epsilon \cdot n + 0,0037561 \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \epsilon - \\ & - 0,0328581 \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot n + 0,0000453 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot n - \\ & - 0,002698 \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot n - 0,2640395 \cdot HRA \cdot S \cdot \alpha + \\ & + 30,0288288 \cdot HRA \cdot S \cdot \epsilon + 0,0004061 \cdot HRA \cdot S \cdot n + \\ & + 0,1461858 \cdot HRA \cdot \alpha \cdot \sigma - 0,0004909 \cdot HRA \cdot \alpha \cdot \epsilon + \\ & + 0,0685837 \cdot HRA \cdot \sigma \cdot \epsilon - 1,964329 \cdot HRA \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma + \\ & + 0,0037818 \cdot HRA \cdot S \cdot \alpha \cdot \epsilon - 0,5399703 \cdot HRA \cdot S \cdot \sigma \cdot n - \\ & - 0,0036522 \cdot HRA \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \epsilon - 0,5640308 \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \epsilon + \\ & + 0,0001304 \cdot HRA \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot n - 0,0000288 \cdot HRA \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot n + \\ & + 0,1225278 \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot n - 0,0002379 \cdot S \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot n + \\ & + 0,0209696 \cdot S \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot n + 0,0003369 \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot n + \\ & + 0,0281346 \cdot HRA \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \epsilon - \\ & - 0,0017695 \cdot S \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot n + 428,4522187. \end{aligned} \quad (12)$$

Для підтвердження адекватності рівняння (12) було проведено оцінку однорідності дисперсій розрахункових та експериментальних значень сил при розрізанні шин за допомогою статистичного критерію Фішера.

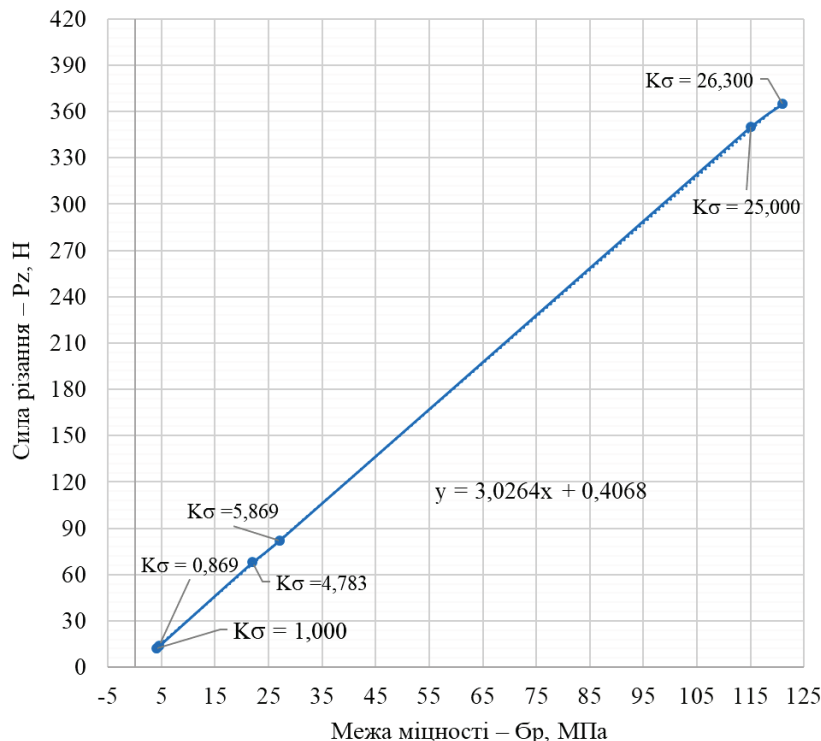


Рис. 7. Графік залежностей сили різання від межі міцності матеріалів різних шин

Аналіз проводився у двох точках плану: $K_{\sigma} = 4,783$ (Hankook Ventus Prime 2 K115 195/55R15 – літні), та $K_{\sigma} = 26,300$ (Michelin XDW ice grip green 315/70R22.5 – зимні), у кожній точці оцінювалися шість значень сил (три експериментальних, три дослідних), які чергуються через одне значення. Результати розрахунків приведені у табл. 10.

Таблиця 10

Оцінка однорідності дисперсій розрахункових та експериментальних значень сил при розрізанні шин за допомогою статистичного критерію Фішера

Номер досліджу	γ_i	y_w , Н	\bar{y}_i , Н	S^2_{yi}	F	$F_{табл}$ при значимості $\alpha = 5\%$ [20]
1	1	69	68,7	3,22	1,349	4,280
	2	66	68,7			
	3	69	68,7			
	4	71	68,7			
	5	69	68,7			
	6	68	68,7			
2	1	365	365,7	2,39	1,349	4,280
	2	368	365,7			
	3	365	365,7			
	4	364	365,7			
	5	365	365,7			
	6	367	365,7			

З табл. 10 можна побачити, що F при значимості $\alpha = 5\%$ менше табличних допустимих значень $F_{табл}$, відповідно: $F < F_{табл}$; $0,350 < 0,507$, що свідчить про однорідність оцінок дисперсій та адекватність рівняння (12).

6. Обговорення результатів дослідження енергоефективності процесу розрізання зношених шин навіпід під час їх утилізації

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 HRA=77 з геометричними параметрами: $\gamma=20^\circ$, $\epsilon=53^\circ$, $\alpha=68^\circ$ та частоті обертання шпинделя $n=1000$ об/хв і подачі ріжучого інструменту $S_p=0,25$ мм/об.

Передній кут γ 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 навіпід 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.

7. Висновки

1. Отримано квадратичну математичну модель для визначення сил різання в процесі розрізання навіпід 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 навіпід, 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 навіпід і забезпечує мінімальні енергетичні витрати.

5. Визначено ефективні геометричні параметри ріжучого інструменту: передній кут $\gamma=20^\circ$, кут при вершині $\epsilon=53^\circ$, 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: $\gamma=20^\circ$, $\epsilon=53^\circ$, $\alpha=68^\circ$ та частоті обертання шпинделя $n=1000$ об/хв і подачі ріжучого інструменту $S_p=0,25$ мм/об.

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-rehulatornoho-vplyvu/argv_21032013.doc
2. Сметанін, В. І. Захист навколишнього середовища від відходів виробництва й споживання [Текст]: навч. пос. / В. І. Сметанін. – М.: Колосся, 2000. – 232 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Сасов, О. О. Експериментальні дослідження впливу геометрії ріжучого інструмента з титан-вольфрамових 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.

8. 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.
9. 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.
10. Рагрин, Н. А. Особенности планирования эксперимента в исследованиях стойкости режущих инструментов [Текст] / Н. А. Рагрин // Современные проблемы теории машин. – 2016. – № 4. – С. 12–13.
11. Грубый, С. В. Оптимизация режимов одноинструментной лезвийной обработки [Текст] / С. В. Грубый // Научно технический журнал СТИН. – 2008. – № 2. – С. 24–26.
12. 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.
13. Таровик, А. Б. Оптимизация режимов резания при обработке тонкостенных цилиндрических изделий [Текст] / А. Б. Таровик, А. Н. Михайлов // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2014. – № 3 (49)-4 (50). – С. 183–187.
14. Sienkiewicz, M. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review [Text] / M. Sienkiewicz, H. Janik, K. Borzędowska-Labuda, J. Kucińska-Lipka // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 147. – P. 560–571. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.121
15. Norambuena-Contreras, J. Experimental evaluation of mechanical and thermal properties of recycled rubber membranes reinforced with crushed polyethylene particles [Text] / J. Norambuena-Contreras, E. Silva-Robles, I. Gonzalez-Torre, Y. Saravia-Montero // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 145. – P. 85–97. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.040
16. Isayev, A. I. Recycling of Rubbers [Text] / A. I. Isayev // The Science and Technology of Rubber. – 2013. – P. 697–764. doi: 10.1016/b978-0-12-394584-6.00020-0
17. Shen, Z. Wear patterns and wear mechanisms of cutting tools used during the manufacturing of chopped carbon fiber [Text] / Z. Shen, L. Lu, J. Sun, F. Yang, Y. Tang, Y. Xie // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Vol. 97. – P. 1–10. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2015.06.008
18. Pagani, M. Explicit dynamics simulation of blade cutting of thin elastoplastic shells using «directional» cohesive elements in solid-shell finite element models [Text] / M. Pagani, U. Perego // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2015. – Vol. 285. – P. 515–541. doi: 10.1016/j.cma.2014.11.027
19. Schuldt, S. Defined abrasion procedures for cutting blades and comparative mechanical and geometrical wear characterization [Text] / S. Schuldt, G. Arnold, J. Roschy, Y. Schneider, H. Rohm // Wear. – 2013. – Vol. 300, Issue 1–2. – P. 38–43. doi: 10.1016/j.wear.2013.01.110
20. Triki, E. Combined puncture/cutting of elastomer membranes by pointed blades: An alternative approach of fracture energy [Text] / E. Triki // Mechanics of Materials. – 2016. – Vol. 97. – P. 19–25. doi: 10.1016/j.mechmat.2016.02.010
21. Сасов, О. О. Отримання математичної моделі формування сил різання при розрізанні навіл зношених автомобільних шин [Текст] / О. О. Сасов, В. С. Авер'янов, Ю. А. Коржавін, А. Д. Соколов // Перспективні технології та прилади. – 2017. – № 10 (1). – С. 168–175.
22. Соколов, А. Д. Оптимізація режимних параметрів процесу різання зношених пневматичних шин, вибір оптимального матеріалу та геометричних параметрів ріжучого інструменту при визначених умовах [Текст] / А. Д. Соколов, О. М. Коробочка, О. О. Сасов // Математичне моделювання. – 2016. – № 2 (35). – С. 53–56.