

УДК 621.9

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛООБРОБКИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

О.О. Богданов¹, В.А. Дербаб², В.М. Рубан³¹e-mail: bohdanov.o.o@nmu.one²e-mail: derbaba.v.a@nmu.one³e-mail: ruban.v.m@nmu.one^{1,2,3}доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

Анотація. У роботі розглядається проблема оптимізації режимів різання при фрезеруванні на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПК). Запропоновано математичну модель для визначення оптимальних параметрів різання, яка враховує технічні обмеження та забезпечує мінімізацію собівартості обробки. Проведено порівняльний аналіз часу обробки при стандартних та оптимізованих режимах різання для фрез різних діаметрів. Результати досліджень демонструють значне скорочення часу обробки та покращення економічної ефективності процесу.

Ключові слова: різальний інструмент, механічна обробка, оптимізація, технологічна оснастка, режими різання, фрезерування.

OPTIMIZATION OF CUTTING MODES TO INCREASE THE EFFICIENCY OF METALWORKING ON CNC MACHINES

Oleksandr Bohdanov¹, Vitalii Derbaba², Vladyslav Ruban³¹e-mail: bohdanov.o.o@nmu.one²e-mail: derbaba.v.a@nmu.one³e-mail: ruban.v.m@nmu.one^{1,2,3}Associate Professor of the Department of technology engineering and materials science Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Abstract. This article considers the problem of optimizing cutting modes during milling on CNC machines. A mathematical model is proposed to determine the optimal cutting parameters, which takes into account technical limitations and ensures minimization of processing costs. A comparative analysis of processing time for standard and optimized cutting modes for cutters of different diameters is carried out. The research results demonstrate a significant reduction in processing time and improvement in the economic efficiency of the process.

Keywords: cutting tool, machining, optimization, technological equipment, cutting modes, milling.

Вступ. Оптимізація режимів різання є одним із ключових завдань сучасного металообробного виробництва. Це пов'язано з постійним зростанням вимог до продуктивності, якості обробки та економічної ефективності. Особливо актуальним це питання стає при використанні верстатів з ЧПК, де можливість точного налаштування параметрів різання дозволяє досягти значних переваг [1–3].

У науковій літературі широко представлені дослідження, присвячені оптимізації режимів різання. Так, у роботах [4-6] розглядаються методи математичного моделювання процесів різання, а також застосування методів лінійного програмування для вирішення задач оптимізації. У [7–10] акцент робиться на вплив режимів різання на знос інструменту та якість поверхні. Однак, більшість існуючих досліджень зосереджуються лише на окремих аспектах проблеми, не надаючи комплексного підходу до вирішення задачі.

Метою даної роботи є розробка математичної моделі для визначення оптимальних режимів різання при фрезеруванні на верстатах з ЧПК, яка враховує технічні обмеження та забезпечує мінімізацію собівартості обробки. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

- 1) Проаналізувати існуючі методи оптимізації режимів різання.
- 2) Розробити математичну модель, яка враховує технічні обмеження процесу фрезерування.
- 3) Провести порівняльний аналіз стандартних та оптимізованих режимів різання для фрез різних діаметрів.

Матеріал і результат досліджень.

Оптимізація режимів різання передбачає визначення таких параметрів, як швидкість різання, подача інструменту та глибина різання, які забезпечують максимальну ефективність процесу обробки. Основними методами оптимізації є:

- Методи математичного моделювання, які дозволяють описати процеси різання через систему рівнянь [11].
- Методи лінійного програмування, які застосовуються для одночасної оптимізації декількох параметрів [12].
- Емпіричні формули, які враховують специфіку оброблюваного матеріалу та інструменту [13].

У даній роботі використовується метод лінійного програмування, який дозволяє врахувати обмеження за потужністю приводу, стійкістю інструменту, жорсткістю системи та іншими факторами.

Математична модель процесу фрезерування містить систему технічних обмежень та цільову функцію. Як цільова функція прийнята собівартість обробки, яка виражається через режими різання. Система обмежень включає [14-17]:

Обмеження за потужністю приводу головного руху верстата.

$$n^{1-w} \cdot S_z^y \leq \frac{1020 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot N_e \cdot \eta}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot D^{1-q} \cdot \pi \cdot z \cdot K_{mp}}, \quad (1)$$

де $N_e = 11,2$ кВт – потужність верстата; $\eta = 0,85$ – коефіцієнт корисної дії верстата; $C_{pz} = 825$, $x = 1$, $y = 0,75$, $u = 1,1$, $q = 1,3$, $w = 0,2$ – коефіцієнти за довідниками; $t = 1,1$ – глибина різання, мм; $B = 1,35$ – ширина фрезерування, мм; $D = 50$ – діаметр фрези, мм; $T = 180$ – стійкість фрези, хв.; $z = 5$ – кількість зубів фрези; $K_{mp} = 0,98$.

Обмеження за стійкістю інструменту.

$$n \cdot S_z^y \leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot D^{1-q} \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot B^u \cdot \pi \cdot z^p}, \quad (2)$$

де $C_v = 332$, $q = 0,2$, $m = 0,2$, $x = 0,1$, $y = 0,4$, $u = 0,2$, $p = 0$ – коефіцієнти за довідниками; $K_v = K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv}$, $K_{mv} = 1,06$ – коефіцієнт який враховує якість обробляемого матеріалу; $K_{pv} = 1$ – коефіцієнт, який враховує стан поверхні заготовки; $K_{iv} = 1$ – коефіцієнт, який враховує матеріал інструменту; $K_v = 1,06$.

Обмеження за жорсткістю інструменту.

$$n^w \cdot S_z^y \leq \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot f \cdot D^q}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot L_{вф}^3 \cdot K_{mp} \cdot K}, \quad (3)$$

де $E = 2,1 \cdot 10^5$ Н/мм² – модуль пружності матеріалу державки; I – момент інерції перерізу державки; f – допустима величина відтиску фрези; $L_{вф}$ – виліт фрези; K_{mp} , K – коефіцієнти.

Обмеження за точністю обробки.

$$n^{-w} \cdot S_z^y \leq \frac{T_H \cdot D^q}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot z \cdot K_{mp} \cdot \omega \cdot K}, \quad (4)$$

де ω – піддатливість технологічної системи; T_H – величина допуску розміру, який оброблюється.

Обмеження за шорсткістю обробленої поверхні.

$$S_z \leq 2,82 \cdot r^{0,5} \cdot R_z^{0,5}, \quad (5)$$

де r – радіус заокруглення різальної кромки; R_z – розрахункова величина нерівностей.

Обмеження за мінімальними та максимальними обертами шпинделя.

$$n \geq n_{\min}. \quad (6)$$

$$n \leq n_{\max}. \quad (7)$$

Обмеження за мінімальною та максимальною подачею.

$$n \cdot S_z \geq \frac{S_{x\min}}{z} \quad (8)$$

$$n \cdot S_z \leq \frac{S_{x\max}}{z} \quad (9)$$

Вибрані технічні обмеження разом із цільовою функцією дозволяють побудувати математичну модель процесу обробки. Як цільову функцію прийнято собівартість операції F , яка виражається через режими обробки у вигляді [16]

$$F = \frac{C}{n \cdot S} \quad (10)$$

де коефіцієнт C залежить від умов обробки, але не залежить від режимів різання.

Цільова функція буде мати наступний вигляд:

$$F = \ln(n) + \ln(S) \rightarrow \max \quad (11)$$

Подача множиться на 100, щоб уникнути отримання негативних значень логарифмів. Введемо позначення: $y = \ln(n)$, $x = \ln(100 \cdot S_z)$.

Для полегшення проведення математичних обчислень всі обмеження та цільова функція були приведені до лінійного вигляду шляхом логарифмування. Розрахунки проводилися з використанням пакету MathCad та додатку Geogebra [16].

В загальному вигляді система обмежень для фрезерної обробки буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} (1-w) \cdot \ln(n) + y^p \cdot \ln(100 \cdot S_z) &\leq \ln\left(\frac{1020 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot N_6 \cdot \eta}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot D^{1-q} \cdot \pi \cdot z \cdot K_{mp}}\right) \\ \ln(n) + y^v \cdot \ln(100 \cdot S_z) &\leq \ln\left(\frac{1000 \cdot C_v \cdot D^{1-q} \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot B^u \cdot \pi \cdot z^p}\right) \\ w \cdot \ln(n) + y^v \cdot \ln(100 \cdot S_z) &\leq \ln\left(\frac{3 \cdot E \cdot I \cdot f \cdot D^q}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot L_{\phi}^3 \cdot K_{mp} \cdot K}\right) \\ -w \cdot \ln(n) + y^p \cdot \ln(100 \cdot S_z) &\leq \ln\left(\frac{T_H \cdot D^q}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot z \cdot K_{mp} \cdot \omega \cdot K}\right) \\ \ln(100 \cdot S_z) &\leq \ln(2,82 \cdot r^{0,5} \cdot R_z^{0,5}) \\ \ln(n) &\geq \ln(n_{\min}) \\ \ln(n) &\leq \ln(n_{\max}) \\ \ln(100 \cdot S_z) &\geq \ln\left(\frac{100 \cdot S_{x\min}}{n \cdot z}\right) \\ \ln(100 \cdot S_z) &\leq \ln\left(\frac{100 \cdot S_{x\max}}{n \cdot z}\right) \\ F &= \ln(n) + \ln(100 \cdot S_z) \rightarrow \max \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Визначення оптимальних режимів обробки за моделлю (12) виконаємо графічним способом. Визначення оптимальних режимів різання графічним методом приведено на рисунку 1. Цифрами від 1 до 9 на ньому позначені криві технічних обмежень, многокутник ABCDE – многокутник рішень. Визначив координати точок А, В, С, D та Е, знайдемо точку, яка буде задовольняти умові $F = y + x \rightarrow \max$.

Координати точок: А (0,65; 8,01); В (3,23; 6,978), С (3,23; 2,3); D (-2,71; 2,3); , Е (-2,71; 8,01). Точка максимуму – В. Оптимальні значення режимів різання:

$$S_z = e^{3,23}/100 = 0,25 \text{ мм/зуб};$$

$$n = e^{6,978} = 1027,27 \text{ об/хв.};$$

$$V = 168,42 \text{ м/хв.};$$

$$T_0 = 0,14 \text{ хв.}$$

Режими різання без оптимізації для фрези $\varnothing 50$ мм.

Швидкість різання:

$$V = \frac{C_v \cdot D^q \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p}, \quad (13)$$

$$V = \frac{332 \cdot 50^{0,2} \cdot 1,06}{180^{0,2} \cdot 1,1^{0,1} \cdot 0,28^{0,2} \cdot 1,35^{0,2} \cdot 5^0} = 422,78 \text{ м/хв.},$$

Частота обертів шпинделю:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}, \quad (14)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 422,78}{\pi \cdot 50} = 2691,5 \text{ об/хв.}$$

Час фрезерування:

$$T_0 = \frac{L}{S_z \cdot n} = \frac{180 + 8 + 1,5}{0,28 \cdot 2691,5} = 0,25 \text{ хв.} \quad (15)$$

За попереднім алгоритмом визначено оптимальні режими різання для фрез діаметром 50, 63, 66, 80, 100 мм. Потім визначено режими різання за стандартними формулами без оптимізації для фрез діаметром 50, 63, 66, 80, 100 мм. Отримані данні для режимів різання приведено в таблицях 1 та 2.

З таблиць 1-2 та графіка (рис. 1) слід, що без оптимізації найменший час на обробку дорівнює 0,25 хв. при використанні фрези діаметром 50 мм, найбільший час на обробку – 0,45 хв. та фрези діаметром 100 мм.

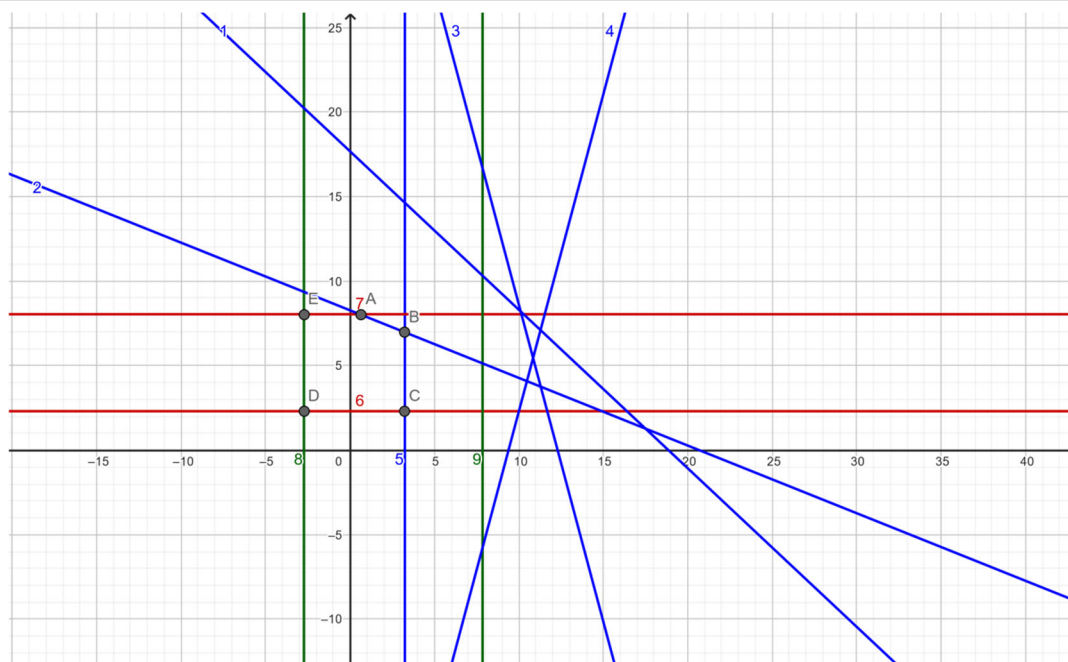


Рис. 1. – Графічне рішення задачі (діаметр фрези 50 мм) з технічними обмеженнями: 1 – за потужністю приводу головного руху верстата, 2 – за стійкістю інструмента, 3 – за жорсткістю інструмента, 4 – за точністю обробки, 5 – за шорсткістю обробленої поверхні, 6 – за мінімальними обертами шпинделя, 7 – за максимальними обертами шпинделя, 8 – за мінімальною подачею, 9 – за максимальною подачею

Таблиця 1. – Режими різання за стандартними формулами

Діаметр фрези D, мм	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Частота обертів шпинделя n , об/хв	Довжина різання L, мм	Швидкість різання V, м/хв.	Час обробки T_0 , хв.
50	0,28	2691,5	189,5	422,78	0,25
63	0,28	2237,16	189,5	442,78	0,3
66	0,28	2155,44	192	446,92	0,32
80	0,28	1847,98	192	464,45	0,37
100	0,28	1545,86	195	485,65	0,45

Після визначення оптимальних режимів різання (подача на зуб та частота обертів шпинделя) для фрез того ж ряду діаметрів час на обробку значно скоротився: при використанні фрези найменшого діаметру 50 мм на 44%, при використанні фрези найбільшого діаметру 100 мм на 64%.

Таблиця 2. – Оптимізовані режими різання

Діаметр фрези D, мм	Подача на зуб Sz, мм/зуб	Частота обертів шпинделя n, об/хв	Довжина різання L, мм	Швидкість різання V, м/хв.	Час обробки T ₀ , хв.
50	0,25	1072,77	189,5	168,42	0,14
63	0,25	896,05	189,5	177,26	0,14
66	0,25	862,64	192	178,77	0,15
80	0,25	741	192	186,14	0,15
100	0,25	620,17	195	194,73	0,16

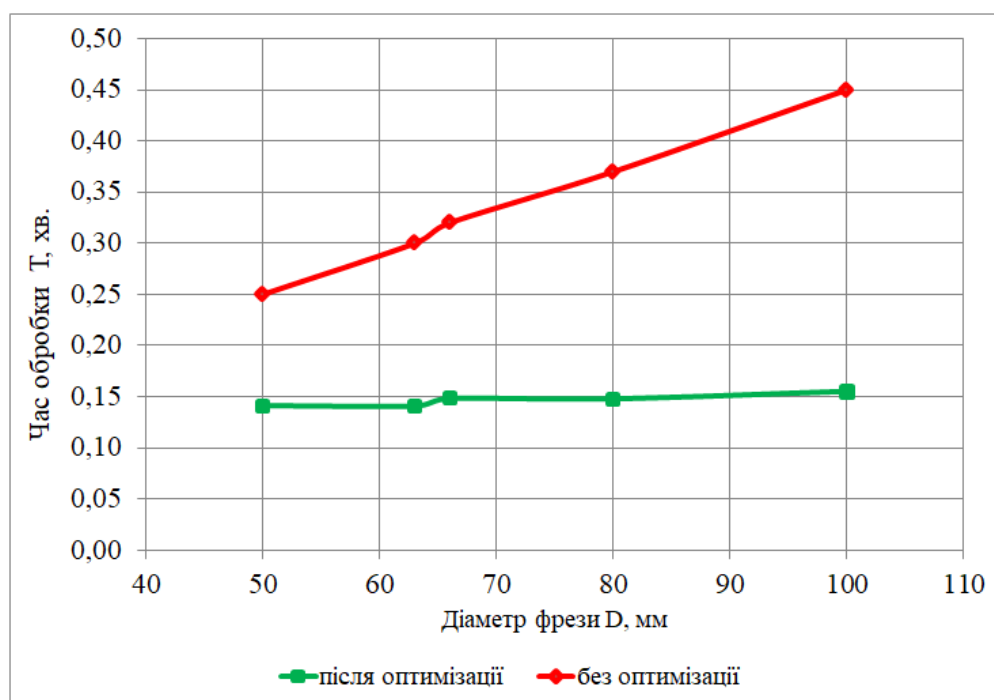


Рис. 2. – Графік залежності часу обробки від діаметру фрези

Крім того встановлено, що при оптимізованих параметрах режиму різання, час на обробку суттєво не залежить від діаметру фрези та знаходиться в межах $T_0 = 0,14 \div 0,16$ хвилин.

Висновки. Розглянуто оптимізацію режимів різання для фрезерування поверхні деталі. Розроблена математична модель для визначення оптимальних значень частоти обертів шпинделя та подачі на зуб. Проведено розрахунки оптимальних режимів різання для діаметрів фрез від 50 до 100 мм.

Обґрунтовано, що при фрезеруванні площини довжиною 180 мм фрезою $\varnothing 50$ мм оптимальні значення подачі на зуб Sz та частоти обертів шпинделя n становлять 0,25 мм/зуб та 1072,77 об/хв., фрезою $\varnothing 63$ мм – Sz = 0,25 мм/зуб, n = 896,05 об/хв., фрезою $\varnothing 66$ мм – Sz = 0,25 мм/зуб, n = 862,64

об/хв., фрезою $\varnothing 80$ мм – $S_z = 0,25$ мм/зуб, $n = 741$ об/хв., фрезою $\varnothing 100$ мм – $S_z = 0,25$ мм/зуб, $n = 620,17$ об/хв.

Встановлено, що при використанні отриманих параметрів режимів різання (S_z та n) час на обробку площини довжиною 180 мм скоротився у порівнянні з режимами різання, які отримані за стандартними формулами, для фрези найменшого діаметру 50 мм на 44%, при використанні фрези найбільшого діаметру 100 мм на 64%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Іванов В. А., Петренко О. М. Оптимізація режимів різання у металообробці. – Київ: Наукова думка, 2019. – 256 с.
2. Сидоренко А. В. Методи математичного моделювання у металообробці. – Львів: ЛНТУ, 2020. – 180 с.
3. Коваленко М. Д. Лінійне програмування у задачах оптимізації. – Харків: ХНУ, 2018. – 200 с.
4. Федоров Ю. М. Технологія механічної обробки металів. – Дніпро: ДНУ, 2021. – 300 с.
5. Григоренко В. Л. Емпіричні формули для розрахунку режимів різання. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 150 с.
6. Оптимізація механічної обробки тіл обертання : монографія / В.Є. Карпусь, О.В. Котляр, В.О. Іванов.; за ред. В.Є. Карпуся. – Харків : НТМТ, 2012. – 296 с.
7. Бондаренко С. П., Кузьменко А. В. Оптимізація процесів фрезерування на верстаках із ЧПК. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. – 220 с.
8. Петренко Л. М. Вплив режимів різання на знос інструменту при обробці сталей. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – 190 с.
9. Васильєв О. І. Якість поверхні при фрезеруванні твердосплавними інструментами. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 170 с.
10. Кравець Р. М. Моделювання процесів різання для підвищення ефективності металообробки. – Львів: Львівська політехніка, 2018. – 200 с.
11. Дмитрієв А. С. Математичні методи в технологіях металообробки. – Дніпро: ДМетІ, 2020. – 230 с.
12. Мельник В. Г. Лінійне програмування в задачах оптимізації технологічних процесів. – Одеса: ОНПУ, 2019. – 180 с.
13. Шевченко І. В. Емпіричні методи визначення параметрів різання для сучасних інструментів. – Харків: ХДПУ, 2021. – 160 с.
14. Математичне моделювання та оптимізація процесів металообробки : монографія / Ф.В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 384 с.
15. Optimization of product processing modes in modeling and programming of machining on machine tools with program control / V. Ruban, V. Derbaba, O. Bohdanov, Ye. Shcherbyna // Національний гірничий університет. Збірник наукових праць. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. – № 72. – С. 222-238. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.222>
16. Щербина Є.Ю. Оптимізація режимів різання при фрезеруванні площини / Щербина Є.Ю., Богданов О.О. // «Наукова весна» 2024: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 27–29 березня 2024 року /

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – С . 26-27.

17. Богданов О. О. Використання пакетів прикладних програм при визначенні оптимальних режимів різання / О. О. Богданов, В. У. Григоренко // Національний гірничий університет. Збірник наукових праць. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. – № 72. – С. 194-201. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.194>

УДК 620.178.4:621.878.2

РОЗРОБКА ВИПРОБУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ ШИН В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Н.С. Керекелиця¹, К.М. Медведський², М.М. Балака³

¹студент групи БМО-22, e-mail: kerekelytsia_ns-2022@knuba.edu.ua

²студент групи БМО-22, e-mail: medvedskyi_km-2022@knuba.edu.ua

³доцент кафедри будівельних машин, e-mail: balaka.mm@knuba.edu.ua

^{1,2,3}Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Анотація. У роботі розглянуто питання підвищення достовірності результатів дослідження абразивного зносу протектора шин самохідних транспортно-технологічних машин шляхом удосконалення випробувальної бази. Запропоновано конструктивне рішення випробувального комплексу, який поєднує самохідний скрепер та стаціонарний стенд, оснащений інформаційно-вимірювальною системою збору і обробки даних.

Ключові слова: знос шин, самохідний скрепер, експлуатація, взаємодія, ґрунт, стаціонарний стенд, випробувальний комплекс.

DEVELOPMENT OF TESTING COMPLEX FOR TIRE WEAR RESEARCH DURING OPERATION

Nikita Kerekelytsia¹, Kostiantyn Medvedskyi², Maksym Balaka³

¹Student of BMO-22 group, e-mail: kerekelytsia_ns-2022@knuba.edu.ua

²Student of BMO-22 group, e-mail: medvedskyi_km-2022@knuba.edu.ua

³Associate Professor of Construction Machinery Department, e-mail: balaka.mm@knuba.edu.ua

^{1,2,3}Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

Abstract. The paper considers the issue of increasing the reliability of abrasive wear research results for tire tread of self-propelled transport and technological machines by improving the testing base. The constructive decision for the testing complex combining the self-propelled scraper and the stationary stand equipped with an information and measuring data collection and processing system is proposed.

Keywords: tire wear, self-propelled scraper, operation, interaction, soil, stationary stand, testing complex.