DOI: 10.25140/2411-5363-2023-1(31)-46-51
УДК 621.9.01

Станіслав Швець
кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: shvetssta@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0355-0166. **ResearcherID:** НОН-8329-2023

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОДАЧІ І ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ

На основі аналізу геометрії утворення висоти шорсткості обробленої поверхні в роботі представлено методику аналітичного розрахунку подачі при визначенні параметрів режиму різання. Уперше запропоновано загальний підхід, який пов'язує значення подачі й параметр шорсткості поверхні Rz. Створені аналітичні залежності й алгоритм застосування тієї з них, яка відповідає конкретній ситуації. Запропонована математична модель визначення оптимального значення швидкості різання. Запропонована математична модель визначення оптимального значення швидкості різання з урахуванням роботи зношування леза.

Ключові слова: *глибина різання; подача; швидкість різання; робота зношування леза; параметр шорсткості.*
Рис.: 4. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Параметри режиму різання відіграють важливу роль у забезпеченні стійкості різальних інструментів, якості й собівартості виробів. Тому визначення їхніх оптимальних значень є першочерговим завданням при розробленні технологічного процесу, а отже, тема дослідження актуальна.

Постановка проблеми. При проєктуванні технологічних процесів обробки металів неодмінно постає завдання вибору значень глибини різання, подачі та швидкості різання. На цей час глибину різання і подачу призначають на підставі наявного досвіду залежно від вимог до якості обробленої поверхні. Після цього, враховуючи ці параметри й рекомендовані граничні значення практично визначають швидкість різання. Проблемою є відсутність аналітичних виразів для розрахунків подачі й номінальних значень швидкості різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес точіння, залежно від вимог до якості обробленої поверхні, складається з різних операцій. Є чорнова, напівчистова і чистова [1; 2]. Sandvik Coromant (Coro Guide 13.1.1) [3] пропонує більш розширений спектр таких операцій: екстремальна обробка (t = 0,25 – 2 мм, s = 0,05 – 0,15 мм/об.), оздоблення (t = 0,5 – 2 мм, s = 0,1 – 0,3 мм/об.), середня обробка (t = 1,5 – 4 мм, s = 0,2 – 0,5 мм/об.), легка чорнова обробка (t = 3 – 10 мм, s = 0,4 – 1 мм/об), чорнова обробка (t = 6 – 15 мм, s = 0,5 – 1,5 мм/об.), важка чорнова обробка (t = 8 – 20 мм, s > 0,7 мм/об.).

Параметри режиму різання (v, s, t) призначаються такими, щоб забезпечити необхідну якість обробленої поверхні й повністю вичерпати працездатність інструмента протягом вибраного періоду його стійкості T. Межа працездатності на вказаних операціях визначається як величина зношення по задній поверхні $h_з$.

Під час чорнового точіння вуглецевої сталі твердосплавним різцем допустиме зношення по задній поверхні досягає $h_з$ = 1,4 мм, під час напівчистової обробки $h_з$ = 1 мм, а чистової $h_з$ = 0,4 мм [1]. Тому лезо, яке використовується на одній із згаданих операцій, характеризується величиною роботи зношення для досягнення граничного значення $h_з$.

Отже, якщо $h_з$ залежить від операції, то тоді, враховуючи рекомендації [1], градацію величини зношення по задній поверхні для уявлень Sandvik Coromant можна записати як: extreme finishing – $h_з$ = 0,2 мм, finishing – $h_з$ = 0,4 мм, medium machining – $h_з$ = 0,6 мм, light roughing – $h_з$ = 0,8 мм, roughing – $h_з$ = 1,1 мм, heavy roughing – $h_з$ = 1,4 мм.

Порівнюючи рекомендації [1] і [3] можна визначити інтервали глибини різання і подачі для чорнової обробки (t = 6 – 20 мм, s = 0,5 – 1,5 мм/об.), для напівчистової обробки (t = 1,5 – 10 мм, s = 0,2 – 1 мм/об.), для чистової (t = 0,25 – 2 мм, s = 0,05 – 0,3 мм/об.). Відповідно до допустимої величини зношення визначається і гранична робота стружкоутворення, яка виконується протягом періоду стійкості. Щоб забезпечити призначений період стійкості при визначених значеннях t і s встановлюється швидкість різання.

© Станіслав Швець, 2023

Математичні залежності між параметрами режиму різання емпіричні, тому аналіз пропонованих різними фірмами значень вказує на значні розбіжності [1; 3-8]. У межах графіка функції $N = f(t, s)$, відповідно до відомої залежності для визначення роботи в системі різання $A = Pz \cdot v \cdot T$, його поверхня повинна бути паралельною до координатної площини ts площиною. Але в дійсності графіки побудовані за рекомендаціями різних фірм відхиляються від таких теоретичних висновків (рис. 1).

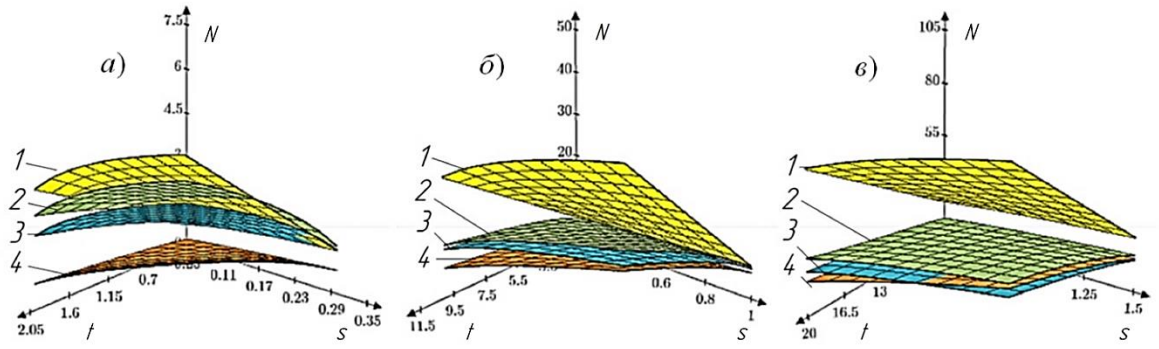

Рис. 1. Залежність потужності різання від глибини різання і подачі за даними Sandvik Coromant (1), Iscar (2), «Нормативів режиму різання» (3), Kyocera (4): а – чистова операція; б – напівчистова операція; в – чорнова операція

Найбільші розбіжності на чистовій операції (рис. 1, *а*) під час точіння сталі 1045 AISI/SAE твердим сплавом за використанням P1. Досить непогано збігаються рекомендації «Нормативів режиму різання», Iscar, Kyocera для напівчистової і чорнової операцій (рис. 1, *б*, *в*).

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питанням вибору параметрів режиму різання приділяється велика увага. Проте аналітичних методів для визначення подачі та швидкості різання не створено.

Метою статті є підвищення точності визначення параметрів режиму різання на підставі використання математичних залежностей.

Виклад основного матеріалу. При визначенні параметрів режиму різання, глибину різання встановлюють відповідно до величини припуску й точності обробки. А подачу можна розрахувати, враховуючи забезпечення необхідної шорсткості.

Подача та геометрія леза створюють висоту залишкового гребеня, яка збільшується (утворюючи висоту нерівностей профілю Rz) за рахунок утворення на ній наросту, а також поглиблення результуючої нерівності зі зменшенням радіуса кривини лінії ковзання, по якій відбувається відрив стружки від заготовки [9]. Але якщо не враховувати вплив пластичної деформації, то подачу для забезпечення потрібного значення Rz (при відомих радіусу при вершині r, головного та допоміжного кутів у плані φ і φ') можна визначити з виразів:

$$s = Rz\left(1/tan\varphi + 1/tan\varphi'\right) - r\left(\left(\left(cos\varphi - 1\right)\right)/sin\varphi + \left(\left(cos\varphi' - 1\right)\right)/sin\varphi'\right). \quad (1)$$

$$s = 2\sqrt{2 \cdot r \cdot Rz - Rz^2}\ . \quad (2)$$

$$s = r\ sin\varphi - \left(-r\ cos\varphi - Rz\right)cot\varphi + \\ + \sqrt{r^2\left(sin\varphi\right)^2 - \left(r - r\ cos\varphi - Rz\right)^2 - 2r\ cos\varphi\left(r - r\ cos\varphi - Rz\right)} \quad (3)$$

$$s = r\ sin\varphi' - \left(r - r\ cos\varphi' - Rz\right)cot\varphi' + \\ + \sqrt{r^2\left(sin\varphi'\right)^2 - \left(r - r\ cos\varphi' - Rz\right)^2 - 2r\ cos\varphi'\left(r - r\ cos\varphi' - Rz\right)}\ . \quad (4)$$

Формулу для розрахунку обирають з урахуванням співвідношення ординат точок переходу допоміжної та головної різальних кромок в дугу радіуса r: $z_a = r(1\text{-}\cos\varphi')$, $z_b = r(1 - \cos\varphi)$ і параметра Rz. Якщо $z_a < R_z$ і $z_b < R_z$ (рис. 2, *а*) – формула (1). Якщо $z_a > R_z$ і $z_b > R_z$ (рис. 2, *б*) – формула (2). Якщо $z_a > R_z$ і $z_b < R_z$ (рис. 2, *в*) – формула (3). Якщо $z_a < R_z$ і $z_b > R_z$ (рис. 2, *г*) – формула (4). Алгоритм визначення подачі наведений на рисунку 3.

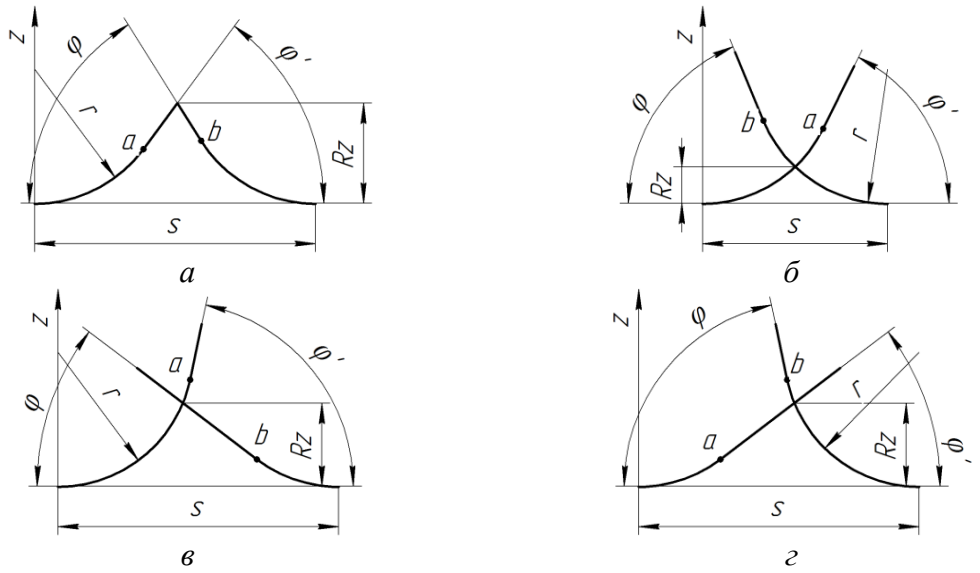

Рис. 2. Схеми утворення параметра шорсткості

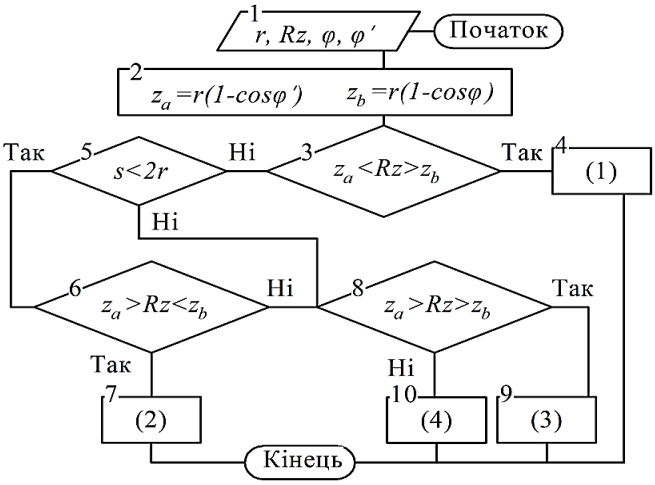

Рис. 3. Алгоритм визначення подачі

З усіх елементів системи різання тільки лезо є постійно навантаженим тілом. Стружка в кожний момент часу формується з нових об'ємів, що надходять із припуску. Напружено-деформований стан цих об'ємів короткочасний і змінюється в періоді контакту стружки з передньою поверхнею леза.

Тому життєвий цикл системи різання визначається лише стійкістю різального леза. Якщо в результаті тертя або повзучості лезо настільки змінює свою форму, що не здатне виконувати функцію різання, то роботу зовнішніх сил, яка призвела до таких наслідків, можна назвати критичною, або граничною.

Причому, вичерпання ресурсу працездатності інструменту не залежить від умов різання. Справедливість цього твердження експериментально перевірена при точінні сталі ШХ-15 пластинами марки ТН-20 (SNMM120404). При різних параметрах режиму різання встановлена робота A, при виконанні якої в експерименті було отримано кожне значення зношення $h_з$. Робота визначалася за відомим виразом

$$A = Pz \cdot V \cdot \tau .$$

Встановлено, що цілком певне значення зношення після різної тривалості різання з різними режимами, відповідає конкретному значенню роботи (рис. 4).

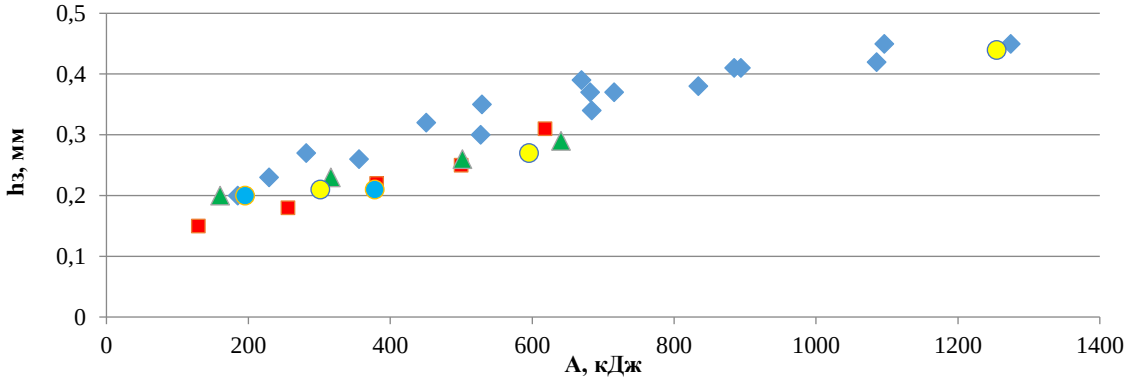

Рис. 4. Зношування леза залежно від роботи зовнішніх сил при різних параметрах режиму різання:
◆ - v=1,97 - 4,45 м/с, s=0,07 мм/об, t=0,1 мм;
■ - v=2,75 - 2, 87 м/с, s=0,09 мм/об, t=0,1 мм;
▲ - v=2,3 - 2,58 м/с , s=0,12 мм/об, t=0,1 мм;
● - v=2,66 - 2,74 м/с, s=0,14 мм/об, t=0,1 мм;
○ - v=2,4 - 2,7 м/с, s=0,07 мм/об, t=0,2 мм

Оскільки руйнація в інструментальному матеріалі (зношення) відбувається в разі підвищення рівня внутрішньої енергії за допомогою роботи зовнішніх сил, то й обсяг руйнувань визначається величиною цієї роботи.

Отже, між зношенням задньої поверхні $h_з$ і величиною роботи зовнішніх сил існує функціональна залежність.

Визначення граничного значення роботи зовнішніх сил під час чорнового, напівчистового чи чистового точіння дозволить визначити (при заданих t і s) оптимальне значення швидкості різання. Складність полягає в визначенні цієї величини. По-перше, це можна зробити експериментально, визначаючи емпіричну залежність $A = f(h_з)$. Але більш привабливим є розрахунок за роботою зношення леза, яка визначається залежно від матеріалу і геометрії леза [10]: $A_{hз} = f(h_з)$.

Задня поверхня інструмента у стружкоутворенні участі не бере. Тому робота зношування леза по задній поверхні не впливає на напружений стан у зоні різання. За значенням зношення по задній поверхні $h_з$ леза з відповідною геометрією робота зношування розраховується як [10]:

$$A_{hз} = h_з^{2,4} \frac{1569 \cdot \sigma \cdot z \cdot (\mu + 40)^{0,0657} \cdot t^{2,0151} \cdot r^{0,2612}}{(\gamma + 20)^{0,042} \cdot (\alpha + 10)^{1,155} \cdot (\alpha^1 + 10)^{0,722} \cdot \varphi^{0,424} \cdot (\varphi^1)^{1,312}}, \quad (5)$$

де σ – межа міцності під час вигину інструментального матеріалу;
z – граничне, руйнуюче число циклів для інструментального матеріалу;
λ – кут нахилу головної різальної кромки;
t – глибина різання;
r – радіус при вершині;
γ – передній кут;
α, α^1 – головний і допоміжний задні кути;
φ, φ^1 – головний і допоміжний кут у плані.

Сила Pz', яка діє на задній поверхні і є складовою сили Pz, не залежить від товщини зрізуваного шару a. Якщо $a = 0$, то $Pz' = Pz$. Тому якщо $a \to 0$ і $Pz' \to Pz$ [11]. Щоб визначити Pz' експериментально знаходять $Pz = f(a)$. Під час екстраполяції кривої $Pz = f(a)$ на нульову товщину зрізуваного шару, точка перетину її з віссю ординат дає значення сили Pz'.

Дослідження показують [12], що в логарифмічних координатах $Pz = f(a)$ – пряма лінія. Тому для визначення залежності

$$lnPz' = lnPz - k \cdot lna$$

достатньо визначити величину Pz для двох значень a. Тоді $k = \frac{lnPz_2 - lnPz_1}{lna_2 - lna_1}$ і

$$Pz' = e^{lnPz - k \cdot lna},$$

де Pz і a – значення із будь-якого із проведених двох експериментів.

Там же доведено, що зношення леза не має суттєвого впливу на складову Pz, тому можна вважати Pz' = const. Звідси, при заданій стійкості T,

$$v = \frac{A_{hз}}{Pz' \cdot T}.$$

Висновки. У роботі вперше запропоновано аналітичний розрахунок подачі при різанні металів. Запропонована математична модель визначення оптимального значення швидкості різання. Це дозволяє вирішити проблему розрахунків параметрів режиму різання.

Дослідження виконано в межах НДР «Інтенсифікація виробничих процесів та розробка інтелектуальних систем контролю якості продукції в інтелектуальному виробництві» (ДР № 0122U200875, Міністерство освіти і науки України).

Список використаних джерел

1. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания. – М. : Экономика, 1990 : 2021. – 473 с.
2. Филоненко С. Н. Резание металлов / С. Н. Филоненко. – К. : Техника, 1975. – 232 с.
3. Coro Guide 13.1.1 [Electronic resource]. – Retrieved from https://only-soft.org/viewtopic.php?t=33075.
4. Your Iscar Tool Advisor [Electronic resource]. – Retrieved from http://www.iscar.com/eCatalog/Index.aspx/.
5. Kyocera, Cutting Tools [Electronic resource]. – Retrieved from https://www.kyoceraprecisiontools.com.
6. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної оборобки : навчально-методичний посібник / Ю. Є. Паливода, А. Є. Дячун, Р. Я. Лещук. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.
7. Анастасенко С. М. Вплив режимів різання на збереження стійкості інструмента: проблеми та шляхи їх вирішення / С. М. Анастасенко, В. Л. Будуров, І. О. Григурко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2016. – Вип. 46. – С. 312–321.
8. Лисих А. Ю. Експериментальне дослідження залежності стійкості інструменту від інтенсивності охолодження і режимів різання / А. Ю. Лисих, В. Л. Будуров // Констроювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2019. – Вип. 49. – С. 141–146.
9. Швец С. В. Системный анализ теории резания / С. В. Швец. – Сумы : СумГУ, 2009. – 212 с.
10. Astakhov V. P. Technical Resource of the Cutting Wedge is the Foundation of the Machining Regime Determination / V. P. Astakhov, S. V. Shvets // International Journal of Manufacturing, Materials and Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 10, Issue 2. – Pp. 1–17. – DOI: 10.4018/ijmmme.2020040101.
11. Бобров В. Ф. Основы теории резания маталлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машностроение, 1975. – 344 с.
12. Аршинов В. А. Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – М. : Машиностроение, 1967. – 500 с.

References

1. *Obshcemashinostroitelnye normativy vremeni i rezhimov rezaniia [General machine-building norms of cutting time and modes]*. (1990 : 2021). Ekonomika.
2. Filonenko. S.N. (1975) *Rezanie metallov [Metal cutting].* Technics.
3. Coro Guide 13.1.1. https://only-soft.org/viewtopic.php?t=33075.
4. Your Iscar Tool Advisor. http://www.iscar.com/eCatalog/Index.aspx/.

5. Kyocera, Cutting Tools. https://www.kyoceraprecisiontools.com/.

6. Palyvoda, Yu.Ye., Dyachun, A.Ye., Leshchuk, R.Ya. (2019). *Instrumentalni materialy, rezhymy rizannya, tekhnichne normuvannya mekhanichnoyi oborobky [Tool materials, cutting modes, technical standardization of mechanical processing: educational and methodological manual]*. Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu.

7. Anastasenko, S.M., Budurov, B.L., Grigurko, I.O. (2016). Vplyv rezhymiv rizannya na zberezhennya stiykosti instrumenta: problemy ta shlyakhy yikh vyrishennia [The influence of cutting modes on the preservation of tool stability: problems and ways to solve them]. *Konstroiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – Design, production and operation of agricultural machines*, *46*, 312–321.

8. Lysykh A. YU., Budurov V. L. (2019) Eksperymental′ne doslidzhennya zalezhnosti stiykosti instrumentu vid intensyvnosti okholodzhennya i rezhymiv rizannya [Experimental study of the dependence of tool stability on cooling intensity and cutting modes]. *Konstroiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – Design, production and operation of agricultural machines*, *49*, 141–146.

9. Shvets, S.V. (2009). *Sistemnii analiz teorii rezaniia [System analysis of cutting theory]*. Sumy State University.

10. Astakhov, V.P., Shvets, S.V. (2020). Technical Resource of the Cutting Wedge is the Foundation of the Machining Regime Determination. *International Journal of Manufacturing, Materials and Mechanical Engineering*, 10(2), 1–17. DOI: 10.4018/ijmmme.2020040101.

11. Bobrov, V.F. (1975). *Osnovy teorii rezaniia metallov [Basics of Matallov cutting theory]*. Mashnostroenie.

12. Arshinov, V.A. (1967). *Rezanie metallov i rezhushchii instrument [Metal cutting and cutting tools]*. Mashinostroenie.

Отримано 20.03.2023

UDC 621.9.01

Stanislav Shvets

PhD in Technical Sciences, Associate Professorof the Department of Machine-Building Technologies and Metal-Cutting Machines
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: shvetssta@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0355-0166. **ResearcherID:** HOH-8329-2023

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING FEED AND CUTTING SPEED

The parameters of the cutting mode play an important role in ensuring the stability of cutting tools, quality and cost of products. Therefore, determining their optimal values is a primary task in the development of a technological process, and, therefore, the topic of research is relevant.

When designing technological processes of metal processing, the task of choosing the values of cutting depth, feed and cutting speed inevitably arises. At this time, the cutting depth and feed are assigned depending on the requirements for the quality of the treated surface. After that, taking into account these parameters and the recommended limit values practically determine the cutting speed. The problem is the lack of analytical expressions for calculations of feed and nominal values of cutting speed.

The analysis of the latest research and publications showed that a lot of attention is paid to the selection of parameters of the cutting mode. However, analytical methods for determining feed and cutting speed have not been created.

The purpose of the article is to increase the accuracy of determining the parameters of the cutting mode based on the use of mathematical dependencies.

Based on the analysis of the geometry of the formation of the height of the roughness of the machined surface, the work presents the method of analytical calculation of feed when determining the parameters of the cutting mode. For the first time, a general approach that relates the feed value and the surface roughness parameter was proposed. Analytical dependencies and an algorithm for applying one of them that corresponds to a specific situation have been created. A mathematical model for determining the optimal value of the cutting speed is proposed. This allows you to solve the problem of calculating parameters of the cutting mode.

In the work, for the first time, an analytical calculation of feed during metal cutting is proposed. A mathematical model for determining the optimal value of the cutting speed, taking into account the work of blade wear, is proposed.

Keywords: *cutting depth; innings; cutting speed; blade wear work; roughness parameter.*

Fig.: 4. References: 9.

Швець С. Математична модель визначення подачі і швидкості різання. *Технічні науки та технології.* 2023. № 1(31). С. 46-51.