

ДЯДЯ С. І., КОЗЛОВА О. Б., ЯХНО Д. А., СУДНИК А. В.

ВПЛИВ ЧАСУ РІЗАННЯ НА ПАРАМЕТРИ КОЛИВАНЬ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

У статті розглядається можливість використання часу різання для визначення умов різання через розрахунок визначального співвідношення. За його значенням визначається одна з п'яти швидкісних зон коливань. Серед них найбільш несприятливою для отримання якості обробленої поверхні є третя швидкісна зона коливань. Для виходу з цієї зони без зменшення швидкості різання пропонується використовувати технологічні прийоми, які збільшують час різання. Зокрема, за рахунок збільшення кута нахилу гвинтової різальної кромки кінцевої фрези. Це дозволяє призначити таке значення кута нахилу, при якому за рахунок часу різання величина визначального співвідношення наближається до другої швидкісної зони коливань, в якій демфуючі властивості процесу різання суттєво зменшують інтенсивність коливань та забезпечують стабільне фрезерування.

Ключові слова: фрезерування, коливання, різальна кромка, кут нахилу, час різання

DYADYA S., KOZLOVA O., YAKHNO D., SUDNIK A.

THE INFLUENCE OF CUTTING TIME ON THE VIBRATION PARAMETERS DURING FINISH MILLING

The article considers the possibility of using cutting time to determine cutting conditions through the calculation of the determining ratio. One of the five speed zones of oscillation is determined by its value. Among them, the third speed oscillation zone is the most unfavorable for obtaining the quality of the machined surface. To exit this zone without reducing the cutting speed, it is proposed to use technological techniques that increase the cutting time. In particular, by increasing the angle of inclination of the helical cutting edge of the end mill. This allows you to assign such a value of the angle of inclination at which, due to the cutting time, the value of the determining ratio approaches the second speed oscillation zone, in which the damping properties of the cutting process significantly reduce the intensity of oscillations and ensure stable milling.

Keywords: milling, oscillations, cutting edge, angle of inclination, cutting time.

1. Вступ. Якість поверхні складнопрофільних тонкостінних деталей, які широко використовуються у авіакосмічній техніці, після кінцевого фрезерування залежить від умов, при яких відбувається обробка. Чисельними дослідженнями [1, 2 та інші] встановлено, що найбільший вплив при цьому мають вібрації. Джерелом їх виникнення є змушуюча сила, що діє на деталь при врізанні зуба інструмента. Тобто при кінцевому фрезеруванні завжди є збудник вимушених коливань. Встановлено, що діючі при різанні коливання виникають у певній послідовності [3]. Спочатку при врізанні зуба інструменту діють вимушені коливання, на які накладаються супроводжуючі вільні коливання (СВК), що згодом згасають. При цьому слід відзначити, що через короткочасність кінцевого фрезерування, що є його особливістю, поширені при точінні та торцевому фрезеруванні сталі автоколивання не виникають [4].

Використання визначального співвідношення (BC), яке розраховується за формулою (1) [5], дозволяє визначити одну з п'яти швидкісних зон коливань і види коливань, що діють в них при кінцевому фрезеруванні.

$$BC = \frac{t_{\text{різ}}}{T_{\text{ВК}}}, \quad (1)$$

де $t_{\text{різ}}$ – час різання, с, $T_{\text{ВК}}$ – період вільних коливань деталі, с.

BC для кожної швидкісної зони коливань обмежується певними величинами [5].

Для розрахунку часу різання та періоду вільних коливань використовуються формули (2) [5] та (3) [6].

$$t_{\text{різ}} = \frac{60}{\pi d n} \cdot \left[\frac{d}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{d} \right) \right) \pm \frac{1}{2} S_z + t g \omega \cdot a_p \right], \quad (2)$$

де n , d , a_e , a_p , S_z , ω – частота обертання шпинделя (об/хв), діаметр фрези (мм), радіальна глибина різання (мм), осьова глибина різання (мм), подача на зуб (мм/зуб), кут нахилу гвинтової різальної кромки (град) відповідно.

$$T_{\text{ВК}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{j}}, \quad (3)$$

де m , j – маса (кг) та жорсткість тонкостінного елемента деталі (Н/м) відповідно.

Загалом, кінцеве фрезерування може відбуватися у будь-якій з п'яти швидкісних зон коливань. На це впливає залежність швидкості різання від властивостей матеріалу, що оброблюється. В першій, четвертій та п'ятій швидкісних зонах коливань при різанні діють тільки вимушені коливання. Але якість поверхні у першій швидкісній зоні при великому часі різання низька і визначається слідами пластичного зсуву матеріалу, що залишається на обробленій поверхні. СВК деталі не з'являються через великі демпфуючі властивості процесу різання. При високошвидкісному фрезеруванні у четвертій та п'ятій швидкісних зонах час різання менший за період СВК, тому вони не виникають. Якість поверхні в цих двох зонах висока і визначається кратністю співвідношення частоти вільних коливань деталі до частоти вимушених коливань [7]. СВК, що діють у другій та третій швидкісних зонах коливань, мають різну інтенсивність і вплив на оброблену поверхню. Якщо в другій швидкісній зоні коливань амплітуда СВК менше 0,02мм, що сприяє стружкоутворенню, і вони згасають до кінця різання, то в третій швидкісній зоні коливань вона значно зростає і не згасає до кінця різання. Саме в

третьої швидкісній зоні коливань діють СВК великої інтенсивності, що впливає на стійкість інструменту, а оброблена поверхня має найбільшу хвилястість. Слід зазначити, що інтенсивність СВК залежить від початкової швидкості різання, з її збільшенням вона зростає. Тому актуальною стоїть задача забезпечення стійкості інструменту та якості поверхні, що обробляється в третій швидкісній зоні коливань без зменшення швидкості різання, від якої залежить продуктивність фрезерування.

Одним з напрямків рішення цієї задачі є використання демпфуючих властивостей процесу різання, дія яких найбільше проявляється у першій ($VC \geq 25$) та другій ($7 < VC < 25$) швидкісних зонах коливань. Це можливо за рахунок достатнього часу різання, щоб демпфування відбулося. Згідно формули (2) на збільшення часу різання впливають радіальна глибина різання a_e , подача S_z та кут нахилу гвинтової різальної кромки ω . Але, якщо збільшення радіальної глибини та подачі суттєво впливає на силу різання, то від кута нахилу вона мало залежить [5]. Тому в даній роботі розглядається вплив кута нахилу різальної кромки ω на час різання та демпфуючі властивості процесу різання при цьому.

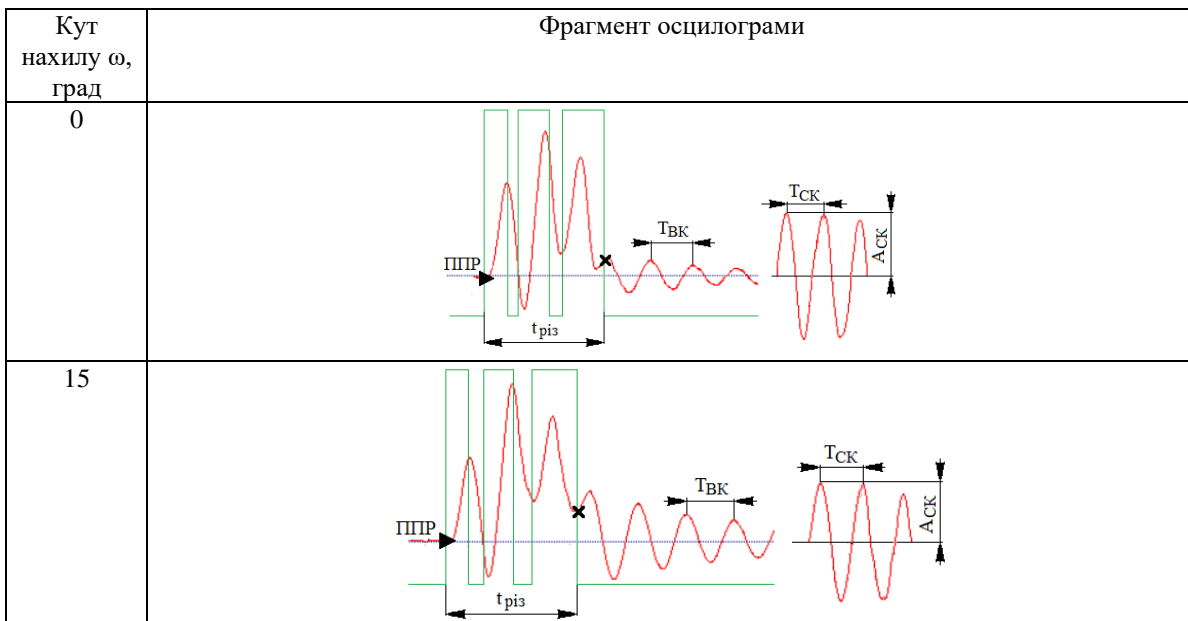
2. Методика досліджень. Дослідження проводилися на спеціальному стенді [5], конструкція якого дозволяє регулювати жорсткість пружного елемента і моделює тонкостінний елемент деталі, встановлювати для обробки зразки з різних матеріалів та відмічати час різання. В якості інструменту використовувалася спеціальна однозуба фреза діаметром $d = 50$ мм, конструкція якої передбачає регулювання кута нахилу гвинтової різальної кромки [5]. Режими різання обиралися для фрезерування деталі, що мала частоту вільних коливань $f_{BK} = 488$ Гц, в третій швидкісній зоні коливань ($1 \leq VC \leq 7$): $n = 280$ об/хв, $a_e = 0,5$ мм, $a_p = 4$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб, при кутах нахилу гвинтової різальної кромки $\omega = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ і зустрічному напрямку подачі.

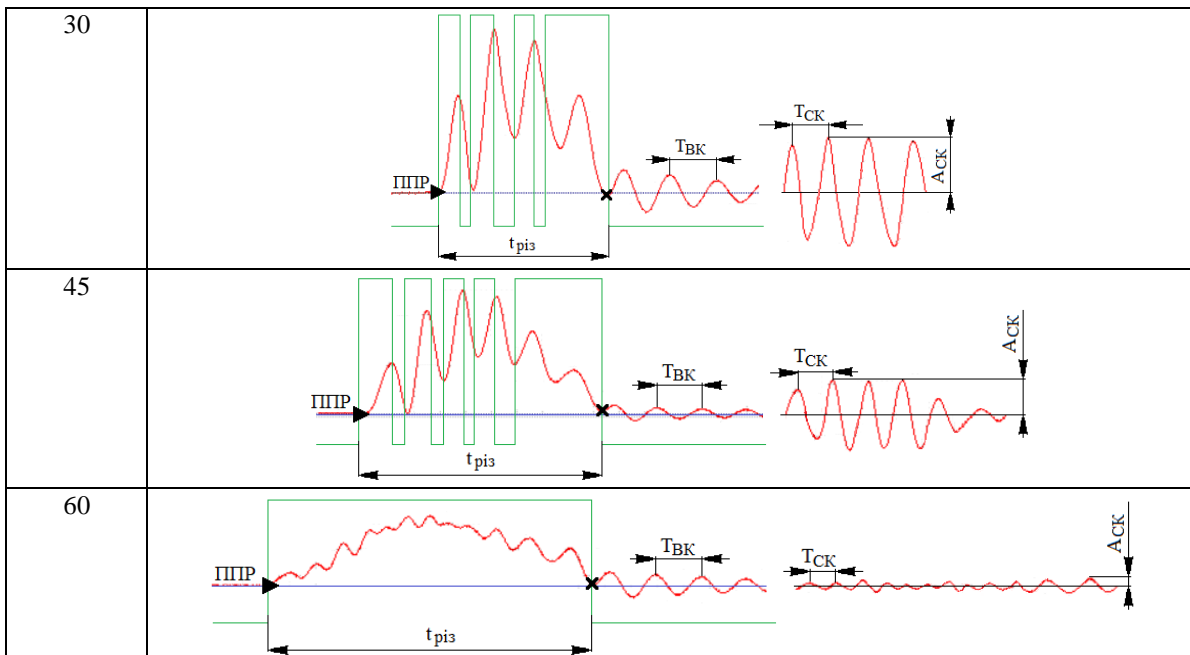
При дослідженнях записувалися осцилограми коливань деталі та час різання. При обробці осцилограми поділялися на окремі фрагменти (рис.1), на яких вимірялися час різання $t_{риз}$, період СВК $T_{СК}$ та їх амплітуда $A_{СК}$, період вільних коливань деталі T_{BK} . Для спрямлення фрагментів осцилограми використовувався фільтр Савицького - Голея [5].

Результати вимірювання наведені у таблиці 1.

Таблиця 1- Час різання, період та амплітуда коливань СВК при фрезеруванні з різними кутами нахилу різальної кромки ω

| Кут нахилу ω , град | Час різання $t_{риз}$, 10^{-3} с | Амплітуда СВК, $A_{СК}$, мм | Період СВК / частота, T_{BK} / f_{BK} 10^{-3} с/ Гц |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|
| 0 | 6,12 | 0,080 | 1,92 / 520 |
| 15 | 6,72 | 0,069 | 1,92 / 520 |
| 30 | 8,58 | 0,069 | 1,86 / 537 |
| 45 | 11,58 | 0,041 | 1,68 / 595 |
| 60 | 15,90 | 0,008 | 1,2 / 833 |





► - точка врізання інструменту в деталь; × - точка виходу інструменту з деталі; ППР – положення пружної рівноваги;
 Рис. 1 – Фрагменти осцилограм при кінцевому фрезеруванні з різними кутами нахилу різальної кромки ω

Дані, які наведені в таблиці 1, показують, що зі збільшенням кута нахилу ω від 0 до 60° час різання збільшується, а інтенсивність коливань зменшується у 10 разів. Крім цього слід зауважити, що період СВК $T_{СК}$ при фрезеруванні з різними кутами нахилу ω більший за період вільних коливань деталі $T_{ВК}$ на 6%-41%.

У таблиці 2 наведені значення ВС, що розраховані за формулою (1). при різанні з різними кутами нахилу ω .

Таблиця 2 - Значення визначального співвідношення при різанні з різними кутами нахилу ω

| Кут нахилу ω , град | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| Визначальне співвідношення (ВС) | 2,98 | 3,28 | 4,18 | 5,65 | 7,75 |

Зі збільшенням кута нахилу ω також збільшується значення ВС, які зміщуються у бік другої швидкісної зони коливань [5], а фрезерування з кутом нахилу $\omega = 60^\circ$ відбувається вже у ній і супроводжується малою інтенсивністю коливань $A_{СК} = 0,008$ мм.

Залежність часу різання $t_{різ}$ від кута нахилу ω пов'язана зі зміною довжини контакту інструменту з деталлю при різанні $l_{різ}$ (рис. 2), яка збільшується зі збільшенням кута ω . При цьому змінюються умови контактування фрези та деталі при різанні, на що впливає довжина активної різальної кромки $l_{арк}$, яка утворюється при проходженні зуба фрези через поверхню різання (рис. 2).

При фрезеруванні довжина активної різальної кромки за умови, що $\omega > 0$, змінюється від мінімального значення при врізанні зуба до найбільшого при проходженні зубом повної осьової глибини a_p і далі поступово зменшується до мінімуму на виході з деталі.

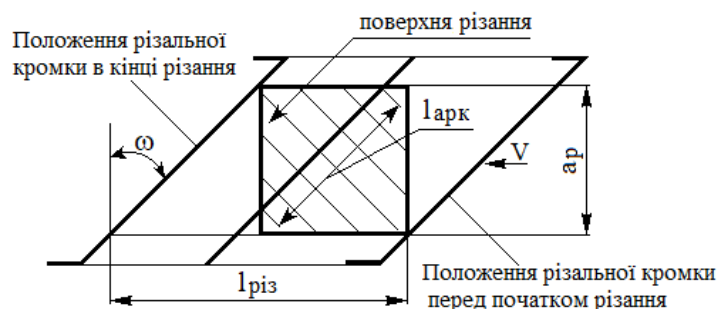


Рис. 2 – Схема визначення довжини активної різальної кромки $l_{арк}$

Найбільша довжина активної різальної кромки в залежності від кута нахилу ω визначається за формулою (4):

$$l_{\text{арк}} = \frac{a_p}{\cos\omega} \quad (4)$$

Демпфуючі властивості шару, що зрізається при кутах нахилу ω від 0 до 45°, при фрезеруванні у третій швидкісній зоні коливальні недостатні для створення сталих умов різання. Хоч амплітуда і зменшується на 50% від $A_{СК} = 0,080$ мм до $A_{СК} = 0,041$ мм, але ці величини більші за сприятливі для стружкоутворення $A_{СК} = 0,020$ мм.

Фрагмент осцилограми, який записаний при фрезеруванні з кутом нахилу $\omega=60^\circ$ (рис. 1), показує, що СВК, виникаючі на початку різання, затухають до ділянки, де довжина активної різальної кромки найбільша. Далі відбувається зменшення демпфуючих властивостей шару, що зрізається, і відбувається від'ємне затухання, при якому спостерігається незначне збільшення амплітуди СВК.

Висновки. Використання розподілу на швидкісній зоні коливальних за допомогою визначального співвідношення дозволяє за отриманими значеннями визначити умови фрезерування. При цьому найбільш несприятливою для отримання якісної обробленої поверхні є третя швидкісна зона коливальних. Щоб вийти з цієї зони, не зменшуючи швидкість різання, можливо використовувати технологічні прийоми, що збільшують час різання. Одним з них є кут нахилу гвинтової різальної кромки ω , збільшення якого збільшує час різання. При цьому значення ВС зміщуються в бік другої швидкісної зони коливальних, що супроводжується зменшенням інтенсивності СВК. Використовуючи розрахунки часу різання при різних кутах нахилу ω та періоду вільних коливальних деталі підбирають значення ВС, що відповідають умовам фрезерування у другій швидкісній зоні коливальних. Таким чином за рахунок часу різання створюють стає фрезерування.

Список літератури:

1. Brian Stone. Chatter and Machine Tools. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 268 p. DOI 10.1007/978-3-319-05236-6.
2. Kai Cheng. Machining Dynamics Fundamental. Applications and Practices Springer Series in Advanced Manufacturing, 2009. 341 p. DOI 10.1007/978-1-84628-368-0.
3. Influence of cutting time on types of oscillations during blade processing. / Y Vnukov, SI Dyadya, OB Kozlova, PR Trishin, AE Zubarev. // Ukr. J. Mech. Eng. Mater. Sci, 2023. Vol. 9, № 1: 53-66. DOI: <https://doi.org/10.23939/ujmems2023.01.053>.
4. Regularities of Oscillations During Turning and End Milling. / S Dyadya, Y Vnukov, O Kozlova, P Trishyn // Springer Nature Switzerland AG 2024. V. Tonkonogyi et al. (Eds) InterPartner 2023, LNME, pp. 136–144, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_13.
5. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей [Электронный ресурс]: монография / [Внуков Ю. Н., Дядя С. И., Козлова Е. Б и др.]; под ред. Ю. Н. Внукова. – Электрон. данные. – Запорожье: ЗНТУ, 2017.-208 с.
6. Кузмичев Е.В. Законы и формулы физики. – Киев: Наук. думка, 1989. – 884 с.
7. Chatter suppression techniques in metal cutting. / Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., Stepan, G.// Manufacturing Technology 65, 785–808 (2016). DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.

References (transliterated)

1. Brian Stone. Chatter and Machine Tools. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 268 p. DOI 10.1007/978-3-319-05236-6.
2. Kai Cheng. Machining Dynamics Fundamental. Applications and Practices Springer Series in Advanced Manufacturing, 2009. 341 p. DOI 10.1007/978-1-84628-368-0.
3. Influence of cutting time on types of oscillations during blade processing. / Y Vnukov, SI Dyadya, OB Kozlova, PR Trishin, AE Zubarev. // Ukr. J. Mech. Eng. Mater. Sci, 2023. Vol. 9, № 1: 53-66. DOI: <https://doi.org/10.23939/ujmems2023.01.053>.
4. Regularities of Oscillations During Turning and End Milling. / S Dyadya, Y Vnukov, O Kozlova, P Trishyn // Springer Nature Switzerland AG 2024. V. Tonkonogyi et al. (Eds) InterPartner 2023, LNME, pp. 136–144, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_13.
5. Self-oscillations during milling of thin-walled elements of parts [Electronic resource]: monograph / [Vnukov Yu. N., Dyadya S. I., Kozlova O.B. and others]; under the editorship Yu. N. Vnukova - Electron. data – Zaporozhye: ZNTU, 2017.-208 p.
6. Kuzmychev E.V. Laws and formulas of physics. - Kyiv: Nauk. dumka, 1989. - 884 p.
7. Chatter suppression techniques in metal cutting. / Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., Stepan, G.// Manufacturing Technology 65, 785–808 (2016). DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Дядя Сергій Іванович (Dyadya Sergei) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Технологія машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7457-7772>; тел.: (050) 996-19-96; e-mail: djadja@zpu.edu.ua.

Козлова Олена Борисівна (Kozlova Olena) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Технологія машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3478-5913>; тел.: (050) 486-54-27; e-mail: kozlova@zpu.edu.ua.

Яхно Денис Анатолійович (Yakhno Denys) – студент кафедри «Технологія машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2816-9397>; тел.: (096)554-90-00; e-mail: Yakhno@gmail.com.

Судник Анна Володимирівна (Sudnyk Hanna) – студентка кафедри «Технологія машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1810-6030>; тел.: (093)631-37-81; e-mail: annasudnik@gmail.com.