

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-85>

УДК 621.914

ТОМАШЕВСЬКИЙ ОЛЕГ

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2639-1866>

e-mail: kmi_too@ztu.edu.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВІБРАЦІЙ У ПРОЦЕСІ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ

Мікрофрезерування є одним з найбільш перспективних процесів мікробудування, оскільки характеризується високою гнучкістю та можливістю формування складних мікрогеометричних елементів з високою точністю. Водночас зменшення геометричних розмірів інструмента та глибини різання суттєво підвищує чутливість процесу різання до вібрацій, які істотно впливають на стабільність процесу, якість обробленої поверхні та стійкість інструмента. У зв'язку з цим дослідження вібраційних характеристик процесу мікрофрезерування є важливим науково-практичним завданням. У статті представлено результати експериментального дослідження і оцінки вібрацій при мікрофрезеруванні титанового сплаву VT1-0 при змінних режимах різання. Для кількісної оцінки інтенсивності вібрацій використовувалися максимальні значення вібраційного прискорення, визначені зі спектрів швидкого перетворення Фур'є. На основі отриманих результатів отримано рівняння регресії, що описує залежність середньоквадратичного значення вібраційного прискорення від режимів різання. Аналіз отриманих даних показав, що швидкість різання є домінуючим фактором впливу на зростання рівня вібрацій, тоді як глибина різання має другорядний вплив.

Ключові слова: вібрації, мікрофрезерування, режими різання, титановий сплав, кінцева фреза.

TOMASHEVSKYI OLEH

Zhytomyr Polytechnic State University

EXPERIMENTAL EVALUATION OF VIBRATIONS IN THE MICRO-MILLING PROCESS OF TITANIUM ALLOY

Micro-milling is widely recognised as an advanced micro-manufacturing process due to its high flexibility and capability to generate complex micro-geometrical features with superior dimensional accuracy. Nevertheless, the reduction of tool diameter and cutting depth has been shown to significantly decrease tool stiffness and increase the sensitivity of the process to dynamic effects. Vibrations arising in the cutting zone directly influence surface integrity, dimensional accuracy, tool wear, and overall process stability. Consequently, a reliable experimental assessment of vibration behaviour under different cutting conditions is of considerable scientific and practical importance, particularly for machining difficult-to-cut titanium alloys. The present study constitutes an experimental investigation of the vibration characteristics exhibited during micro-milling of VT1-0 titanium alloy under varying cutting parameters. The experiment employed a two-flute carbide end mill with a diameter of 1 mm and a TiAlN coating. Vibration signals were measured using a piezoelectric accelerometer. The vibration intensity was quantified using the root mean square (RMS) value of vibration acceleration, calculated from time-domain signals corresponding to the cutting stage with full radial engagement of the cutting tool. Fast Fourier Transform analysis was conducted to ascertain the predominant frequency components and to evaluate the spectral distribution of vibration energy. The development of a regression model incorporating interaction effects between cutting parameters was informed by experimental data. Variance analysis demonstrated that cutting speed is the dominant factor affecting vibration level, contributing more than half of the total variance of RMS values. Axial depth of cut exhibited a secondary yet statistically significant influence, while feed per tooth did not demonstrate a significant effect within the investigated range due to the size effect and ploughing-dominated cutting regime. The obtained results provide practical recommendations for selecting cutting parameters to ensure improved vibration stability and enhanced machining performance in micro-milling of titanium alloys.

Keywords: vibrations, micro-milling, cutting conditions, titanium alloy, end mill.

Стаття надійшла до редакції / Received 16.02.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026

Опубліковано / Published 29.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Томашевський Олег

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Зростання попиту на мікроелементні компоненти зі складною геометрією, високими вимогами до точності та якості поверхні зумовлює інтенсивний розвиток технологій мікрорізання. Порівняно з іншими методами, такими як лазерна або електроерозійна обробка, мікрофрезерування забезпечує високу геометричну точність, відтворюваність форми та можливість формування складних просторових поверхонь для широкого спектру матеріалів, включаючи важкооброблювані сплави [1, 2]. Разом із тим, зменшення діаметра різального інструмента супроводжується істотним зниженням його згинальної жорсткості та демпфувальних властивостей. За таких умов динамічні явища набувають визначального впливу на перебіг процесу мікрорізання. Це може призводити до виникнення значних вібрацій, які негативно впливають на якість обробленої поверхні, знос інструмента та стабільність процесу в цілому [3]. Додаткову проблему становлять самозбуджувані вібрації, що виникають унаслідок регенеративного механізму стружкоутворення та складної динамічної взаємодії між шпинделем, інструментом і заготовкою [4,5].

Особливо складною є задача забезпечення динамічної стабільності процесу фрезерування титанових сплавів, які належать до важкооброблюваних матеріалів через низьку теплопровідність, високу хімічну активність і схильність до пружно-пластичного відновлення. Такі фізико-механічні властивості зумовлюють

нерівномірний характер стружкоутворення, локальну концентрацію тепла та змінні силові навантаження на інструмент, що сприяє виникненню та підсиленню вібраційних процесів у технологічній системі. Підвищений рівень вібрацій призводить до погіршення якості обробленої поверхні, зниження точності формоутворення та інтенсифікації зносу мікроінструмента [6, 7].

Незважаючи на наявність робіт, присвячених динаміці фрезерування титанових сплавів, кількість досліджень, спрямованих саме на експериментальну оцінку вібрацій у процесі їх мікрофрезерування, є обмеженою. У зв'язку з цим експериментальні дослідження вібрацій при мікрофрезеруванні титанових сплавів мають важливе наукове та прикладне значення.

Аналіз досліджень та публікацій

Вібрації під час фрезерування зумовлені переривчастим характером різання та збудженням коливань змінними силами різання, а їх рівень визначається динамічними властивостями технологічної системи. Зміна режимів різання (швидкості різання, подачі, глибини різання) безпосередньо впливає на амплітудно-частотні характеристики коливань, що проявляється у зміні спектрального складу сигналів сил і їх прискорень. Тому аналіз вібраційних сигналів у часовій та частотній областях є важливим інструментом оцінки динамічної стабільності процесу.

Antoniali A.I.S. та ін. [6] показали, що вібраційні характеристики процесу фрезерування титанового сплаву тісно пов'язані з режимами різання та динамічними властивостями технологічної системи, а спектральний склад сигналів сил і вібрацій може використовуватися для ідентифікації нестабільних режимів різання. Зокрема, встановлено, що зі збільшенням швидкості різання та глибини різання зростає амплітуда коливань, а у спектрах сигналів з'являються додаткові частотні компоненти, пов'язані з регенеративним механізмом самозбуджуваних вібрацій.

У дослідженні Kurpiel та ін. [7] розглянуто особливості вібраційних сигналів при фрезеруванні тонкостінних елементів з титанового сплаву. Автори показали, що середньоквадратичне значення вібраційних сигналів може бути використане як інтегральний показник рівня вібраційного навантаження та як критерій вибору раціональних режимів різання.

Разом з тим, процеси мікрорізання характеризуються принциповими відмінностями від макрорізання. Це зумовлено проявом масштабного ефекту, коли товщина зрізаного шару є співрозмірною з радіусом округлення різальної кромки інструмента та характерними розмірами мікроструктури матеріалу [8, 9]. За таких умов різання часто переходить у режим «оранки» (англ. *ploughing*) або змішаного деформування, що супроводжується зростанням тертя, тепловиділення, питомої сили різання [10] та рівня вібрацій. Крім того, значний вплив мають явища пружно-пластичного відновлення матеріалу після проходження різальної кромки, що призводить до додаткових динамічних збурень та ускладнює прогнозування стабільності процесу [11–13].

Значний внесок у розвиток теорії вібрацій при мікрофрезеруванні зробили Li H., Li X, Jin X., Shi Y., Jun M. B. G., Afazov S. M. та ін. У їхніх роботах показано, що зі збільшенням подачі та/або осьової глибини різання (і відповідним зростанням сил різання) спостерігається не лише зростання амплітуди вібрацій, але й характерне зміщення домінуючих частотних компонентів у спектрі сигналу [14]. Встановлено, що при виникненні динамічної нестабільності домінуючі частоти часто зміщуються в область власних частот системи «інструмент–шпиндель–заготовка», а у спектрах з'являються ознаки амплітудної та частотної модуляції, що є типовою ознакою розвитку вібрацій. Автори [15] показали, що частота вібрацій у зоні різання може як наблизитися до власної частоти інструмента, так і суттєво від неї відхилитися залежно від швидкості шпинделя, умов затиску та довжини вільоту інструмента. Це означає, що області стабільності процесу різання не є фіксованими та змінюються під впливом технологічних параметрів різання, а також конструктивно-динамічних параметрів системи.

Масштабний ефект та пружне відновлення матеріалу призводять до нелінійного характеру процесу мікрофрезерування. Саме тому традиційні макромоделі не дають достатньої точності. Моделі Jun et al. та Afazov et al. враховують гіроскопічні ефекти та нелінійність сил різання, але навіть вони не охоплюють усю складність динамічного процесу в мікромасштабі [16]. Крім того, експериментально визначити частотні характеристики мікроінструментів за допомогою класичних методів (наприклад, ударного молотка) практично складно через їхню малу масу та високу власну частоту [17].

Для кількісної оцінки вібраційних процесів у мікрофрезеруванні застосовується середньоквадратичне значення вібраційного прискорення (RMS). Цей параметр є інтегральною характеристикою енергії вібраційного сигналу в широкому частотному діапазоні та дозволяє узагальнено оцінювати динамічний стан процесу різання. У низці робіт показано, що RMS є чутливим індикатором переходу від стабільного різання до режимів з підвищеною динамічною нестабільністю та може використовуватися для порівняльного аналізу впливу режимів різання на вібраційну поведінку оброблюваної системи [14, 18]. На відміну від локального аналізу окремих спектральних компонентів, використання RMS спрощує інтерпретацію результатів і є зручним для практичного застосування.

Аналіз літературних джерел показує, що, незважаючи на значний обсяг досліджень, присвячених вібраційним явищам при фрезеруванні титанових сплавів, залишаються обмеженими дослідження вібраційних явищ при їх мікрофрезеруванні. Вібраційна стабільність процесу мікрофрезерування титанових сплавів при різних режимах різання недостатньо вивчена.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є експериментальна оцінка залежності рівня вібрацій у процесі мікрофрезерування титанового сплаву VT1-0 від режимів різання.

Виклад основного матеріалу

У дослідженнях використовувалася заготовка з титанового сплаву VT1-0 розміром $135 \times 78 \times 33$ мм. Хімічний склад та фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу наведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Хімічний склад титанового сплаву VT1-0 [19]

Ti	Si	Fe	O	C
99,3	0,1	0,3	0,2	0,1

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості титанового сплаву VT1-0 [19]

Твердість, МПа	Межа міцності σ_B , МПа	Ударна в'язкість КСУ, кДж/м ²	Коефіцієнт тепло-провідності, Вт/(м·град)	Густина матеріалу, кг/м ³	Питома теплоємність, Дж/(кг·град)
HB 131–163	295-540	500-1000	18,85	4505	540

Дослідження проводилися на вертикально-фрезерному верстаті HAAS VF-2SSYT-NG. В якості різального інструменту застосовувалася твердосплавна двозуба фреза діаметром 1 мм виробництва FrezyCNC з покриттям TiAlN [20]. Обробка здійснювалася без застосування мастильно-охолоджувальної рідини. З метою забезпечення сталості умов експерименту та виключення впливу зносу інструменту для кожного випробування використовувалася нова фреза. Для зчитування, обробки та запису даних використовувався п'єзоелектричний віброперетворювач ДН-3 (табл. 3), встановлений за напрямком складової P_x сили різання, аналого-цифровий перетворювач E20-10 L-Card, персональний комп'ютер та спеціалізоване програмне забезпечення LGraph. Схема експериментальної установки показана на рисунку 1.

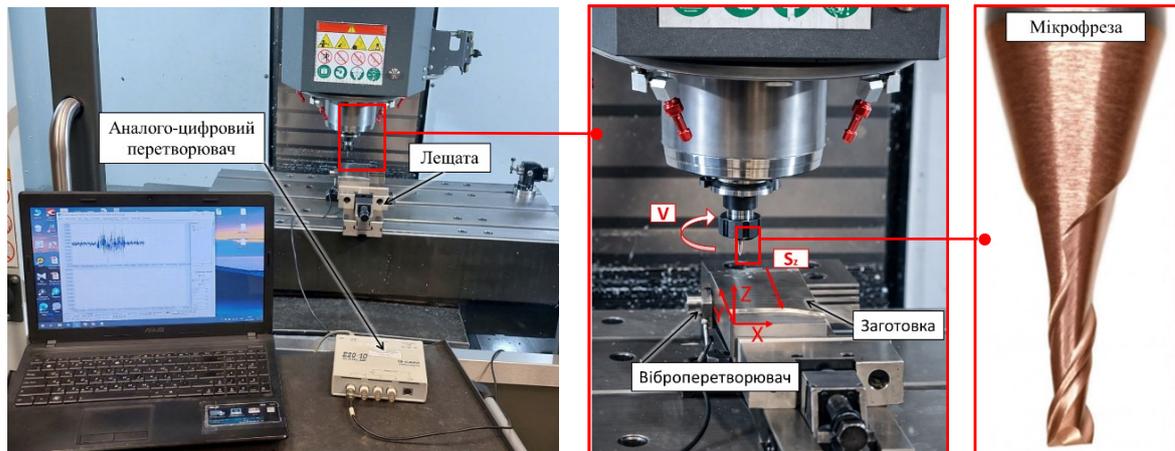


Рис. 1. Експериментальна установка

Таблиця 3

Технічні характеристики віброперетворювача ДН-3

Робочий діапазон частот, Гц	до 4000
Дійсне значення коефіцієнта перетворення віброперетворювача на частоті 160 Гц, мВ·С ² /м	±10%
Відносний коефіцієнт поперечного перетворення, %	<5

Експериментальні дослідження процесу мікрофрезерування виконувалися згідно плану, наведеного в табл. 4.

Середньоквадратичне значення вібраційного прискорення, обчислювалося за формулою:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2}, \quad (1)$$

де a_i – миттєві значення прискорення, м/с²; N – кількість відліків у вибраному часовому інтервалі.

Режими різання			
№	Глибина різання t , мм	Подача S_z , мм/зуб	Швидкість різання V , м/хв
1	0,03	0,001	10
2	0,1		
3	0,03	0,002	
4	0,1		
5	0,03	0,003	
6	0,1		
7	0,03	0,001	14
8	0,1		
9	0,03		
10	0,1	0,002	
11	0,03		
12	0,1		
13	0,03	0,001	18
14	0,1		
15	0,03		
16	0,1	0,002	
17	0,03		
18	0,1		

Первинні дані реєструвалися у вигляді сигналу напруги з віброперетворювача, як функції часу. Для кожного експерименту сигнал розділявся на характерні стадії процесу: холостий хід, врізання інструмента в заготовку та стадію різання з повним радіальним врізанням фрези (рис. 2). Упродовж холостого ходу реєструються низькоамплітудні коливання. Починаючи з моменту врізання фрези в заготовку, амплітуда коливань різко зростає, а форма сигналу набуває нерегулярного та хаотичного характеру.



Рис. 2 Часова залежність вихідного сигналу датчика вібрацій при мікрофрезеруванні (експеримент №1: $S_z=0,001$ мм/зуб, $t=0,03$ мм, $V=10$ м/хв)

Подальший аналіз даних ґрунтувався на спектральному аналізі вібраційних сигналів, отриманих в обраному часовому інтервалі 0,3 с. Розрахунок RMS здійснювався для кожного експерименту за сигналами, що відповідали стадії різання з повним радіальним врізанням фрези. Ділянки холостого ходу та врізання інструмента в заготовку з аналізу виключалися з метою усунення впливу перехідних явищ та фонових коливань. Для кожного режиму різання RMS визначалося для п'яти часових інтервалів 0,3 с. із максимальною амплітудою вібраційного прискорення, що дозволило отримати узагальнену оцінку рівня вібрацій.

Швидке перетворення Фур'є забезпечує перехід від часової області сигналу до частотної та дозволяє визначити домінантні частоти, амплітудний склад і розподіл енергії вібраційного сигналу.

Частота проходження зубців f_z (Гц) визначається як:

$$f_z = \frac{n \cdot z}{60}, \tag{2}$$

де n – швидкість обертання шпинделя, об/хв; z – кількість зубців фрези.

Для режиму $n=3183$ об/хв (швидкість різання 10 м/хв, частота обертання шпинделя $f_{ш}=53$ Гц) у спектрі вібраційного прискорення на холостому ході (рис. 3а) спостерігаються вузькосмугові піки на 53 Гц та 106 Гц. Пік 106 Гц при $z=2$ збігається з $f_z=2f_{ш}$, однак за відсутності різання його доцільно інтерпретувати як 2-гу

гармоніку обертальної частоти, зумовлену биттям вузла шпindelь-інструмент. Також фіксуються піки на 1060, 1166, 1590, 1749, 1961, 3392, 3922 Гц.

Під час врізання (рис. 3б) та різання з повним радіальним врізанням фрези (рис. 3в-ж) спектр зберігає дискретний характер із домінуючими піками в області 1153–3983 Гц (зокрема 1153, 1593, 2541–2543, 2600, 2633, 3766, 3820, 3926, 3983 Гц), що вказує на переважання вимушених коливань і можливе резонансне підсилення окремих частотних складових конструкції.

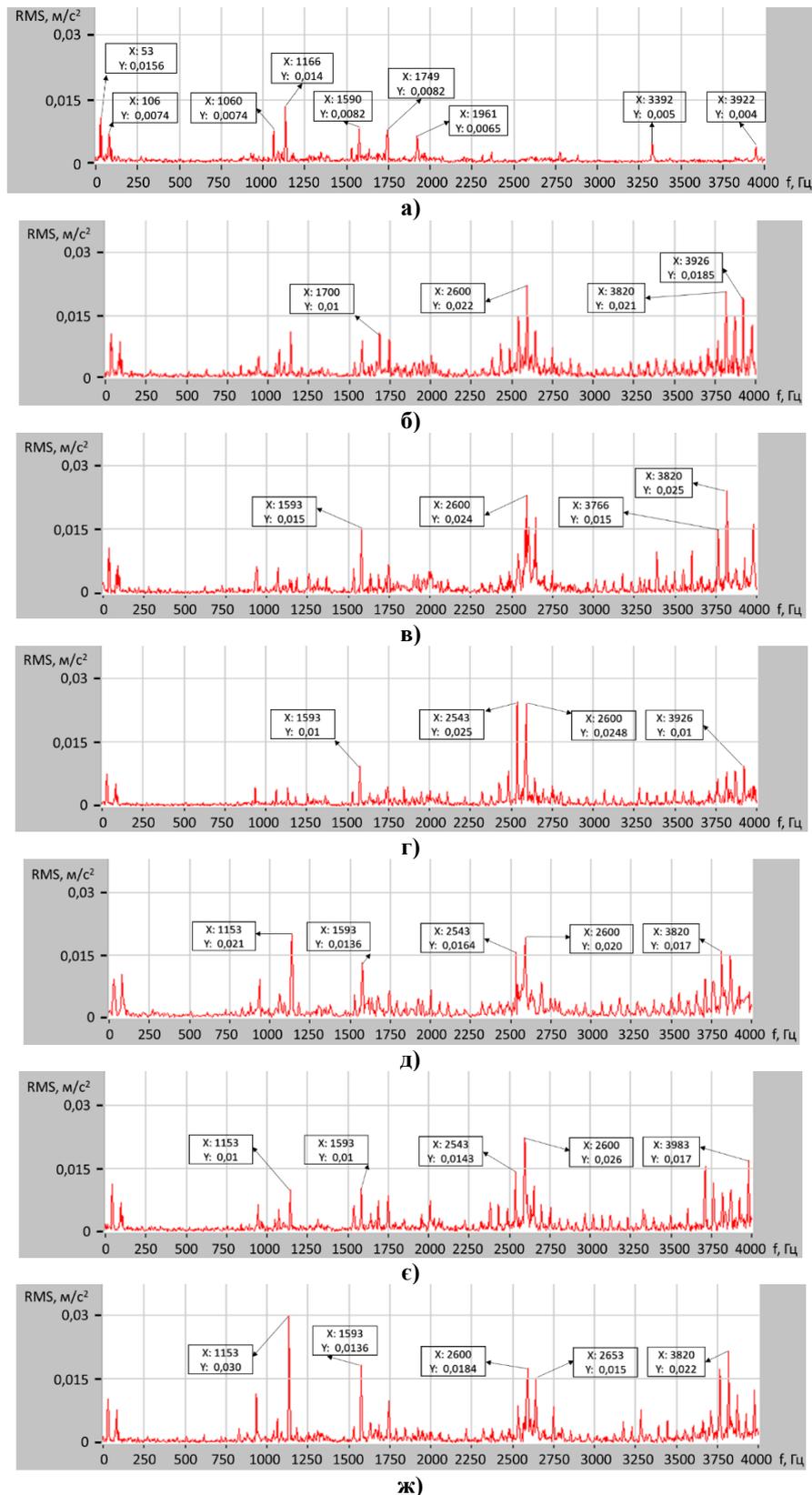


Рис. 3. Частотні спектри сигналу вібраційного прискорення, що відповідають часовим зонам рис. 2 (експеримент №1: $S_z=0,001$ мм/зуб, $t=0,03$ мм, $V=10$ м/хв)

Для окремих станів процесу зафіксовано домінуючі піки на частотах 1166, 1590 і 3816 Гц, при цьому інтервали між ними є кратним до частоти проходження зубців 106 Гц, а також спостерігаються гармоніки, що вказує на ефект амплітудної або частотної модуляції. Такі спектральні ознаки характерні для випадків, коли високочастотний несучий сигнал (резонанс системи) модулюється низькочастотним збудженням, пов'язаним із обертанням інструмента та процесом різання.

Результати експериментів та їх обговорення

Як показано в табл. 5, рівень вібрацій, оцінений за RMS, істотно змінюється залежно від режимів мікрофрезерування титанового сплаву BT1-0.

Таблиця 5

Амплітуда вібраційного прискорення аналізованої ділянки (м/с²)

Стадія процесу різання						
№	Різання з повним радіальним врізанням фрези					RMS
	1	2	3	4	5	
1	0,025	0,025	0,021	0,026	0,030	0,0256
2	0,047	0,050	0,035	0,027	0,060	0,0453
3	0,030	0,045	0,024	0,028	0,045	0,0355
4	0,047	0,052	0,058	0,051	0,036	0,0493
5	0,058	0,033	0,037	0,045	0,015	0,0402
6	0,030	0,050	0,044	0,038	0,0615	0,0460
7	0,049	0,0615	0,051	0,055	0,028	0,0502
8	0,044	0,055	0,047	0,044	0,043	0,0466
9	0,027	0,054	0,040	0,050	0,072	0,0509
10	0,047	0,056	0,042	0,067	0,041	0,0515
11	0,042	0,032	0,057	0,055	0,058	0,0499
12	0,058	0,047	0,057	0,047	0,035	0,0495
13	0,059	0,035	0,056	0,038	0,057	0,0501
14	0,060	0,060	0,082	0,083	0,085	0,0749
15	0,053	0,054	0,042	0,050	0,047	0,0494
16	0,066	0,075	0,070	0,074	0,062	0,0696
17	0,056	0,052	0,048	0,053	0,052	0,0523
18	0,079	0,076	0,08	0,078	0,079	0,0784

На основі дисперсійного аналізу експериментальних даних побудовано лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій факторів, яка описує залежність RMS вібраційного прискорення від параметрів режиму різання:

$$RMS = 0,0508444 - 0,005944t - 0,010528V + 0,0065111tV \tag{3}$$

Коефіцієнт детермінації отриманої регресійної моделі $R^2 = 0,98$, що свідчить про високу ступінь узгодженості експериментальних даних із результатами регресійного аналізу.

Згідно з результатами дисперсійного аналізу (табл. 6), домінуючими факторами, що впливають на рівень вібрацій, є швидкість різання та осьова глибина різання (рис. 4), внесок яких становить понад 76 % від загальної варіації RMS. Разом з тим в досліджуваному діапазоні режимів різання подача не виявляє статистично значущого впливу на RMS вібраційного прискорення.

Таблиця 6

Результати дисперсійного аналізу

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
t	0,00063606	1	45,8869	0,0025	0,00063724	23,056
S _z	0,00004673	2	1,6858	0,2944	0,00004602	1,694
V	0,00148011	2	53,3896	0,0013	0,00146965	53,652
t×S _z	0,00000765	2	0,2759	0,7723	0,00000752	0,277
t×V	0,00046582	2	16,8028	0,0113	0,00008427	16,885
S _z ×V	0,00006689	4	1,2064	0,4300	0,00001152	2,425
Залишок	0,00005545	4	-	-	0,000014	2,010
Разом (скориговано)	0,00275870	17	-	-	-	100,00

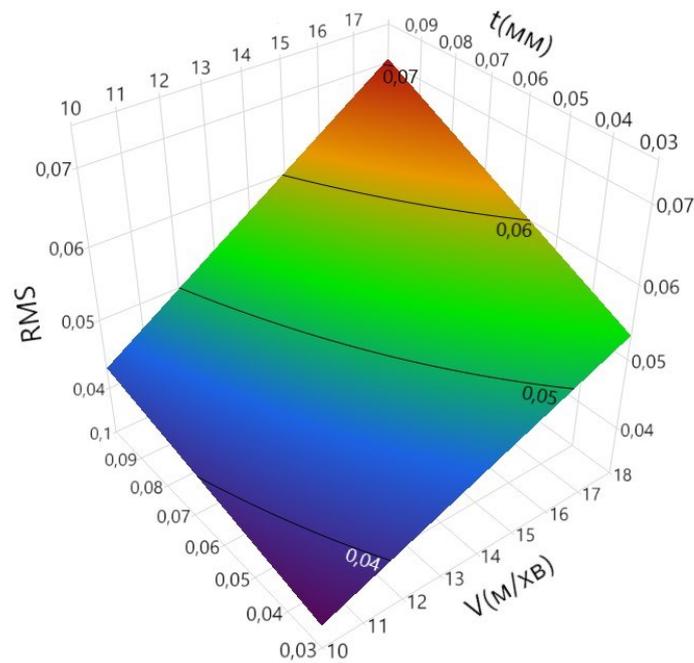


Рис. 4. Залежність RMS вібраційного прискорення від значень швидкості та глибини різання

Аналіз експериментальних даних показав, що швидкість різання (внесок у варіацію RMS 53,6%, табл. 6) є домінуючим фактором формування інтенсивності вібрацій при мікрофрезеруванні сплаву VT1-0. Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними Shi та ін. [15], де показано, що саме частота обертання шпинделя визначає рівень динамічної нестабільності в процесі мікрофрезерування.

Внесок осової глибини різання у варіацію RMS становить 23,06 % (табл. 6), що характеризує її як другорядний фактор впливу. Це відповідає результатам [16 та 18], де показано, що допустима глибина різання істотно змінюється залежно від швидкості шпинделя та зростає у зоні нижчих швидкостей.

Відсутність статистично значимого впливу подачі на значення RMS вібраційного прискорення може бути пов'язана з масштабним ефектом процесу мікрофрезерування, коли товщина зрізу є співрозмірною або меншою за радіус округлення різальної кромки. В даному дослідженні значення подачі на зуб змінювалося в межах 0,001–0,003, в той час як радіус заокруглення різальної кромки складав 0,005–0,01 мм. За таких умов домінує режим «оранки», що знижує чутливість вібраційних відгуків до зміни подачі.

З метою забезпечення динамічної стійкості процесу мікрофрезерування та зниження вібраційного навантаження доцільно обмежувати значення осової глибини різання ($t = 0,10$ мм) та швидкості різання ($V = 18$ м/хв). Обґрунтований вибір режимів різання дозволить підвищити ресурс різального інструмента, а також якість обробленої поверхні, що особливо важливо при обробці точних мікропазів і тонкостінних елементів.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Виконане експериментальне дослідження вібрацій при мікрофрезеруванні титанового сплаву VT1-0 дозволяє зробити наступні висновки.

Рівень вібрацій при мікрофрезеруванні істотно залежить від параметрів режиму різання. Домінуючий вплив на RMS вібраційного прискорення здійснює швидкість різання, тоді як осова глибина різання має другорядний вплив. Підтверджено значущість взаємодії між глибиною різання та швидкістю різання. Вплив подачі на зуб у досліджуваному діапазоні режимів різання не виявився статистично значущим. На основі експериментальних даних побудовано лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій факторів, яка адекватно описує зміну RMS залежно від режимів різання із коефіцієнтом детермінації $R^2=0,98$.

Мінімальний рівень вібрацій забезпечується при осовій глибині різання $t=0,03$ мм та швидкості різання $V=10$ м/хв. За цих умов процес характеризується переважанням вимушених коливань і відсутністю ознак динамічної нестабільності.

Отримані результати можуть бути використані для обґрунтованого вибору режимів мікрофрезерування титанового сплаву VT1-0 з метою підвищення вібраційної стабільності процесу різання та стійкості різального інструмента, а також забезпечення якості оброблених мікроповерхонь. Подальші дослідження доцільно спрямувати на багатокритеріальну оптимізацію режимів мікрофрезерування титанових сплавів із урахуванням вібраційної стійкості процесу, складових сил різання, температурного стану зони різання, стійкості інструмента та показників якості обробленої поверхні.

Література

1. Томашевський О. О. Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд / О. О. Томашевський, Н. О. Балицька // *Технічна інженерія*. – 2023. – № 2(92). – С. 74–88. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88).
2. Camara M. A. State of the art on micromilling of material: a review / M. A. Camara, J. C. Rubio Campos, A. M. Abrao, J. P. Davim // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2012. – Vol. 28. – P. 673–685. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60115-7](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60115-7).
3. Cheng K. Micro-cutting: fundamentals and applications / K. Cheng, D. Hou. – Chichester : Wiley & Sons, 2013. – 368 p.
4. Jin X. Chatter stability model of micro-milling with process damping / X. Jin, Y. Altintas // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2013. – Vol. 135, No. 3. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4024038>.
5. Bai Q. Machining dynamics and chatters in micro-milling: A critical review on the state-of-the-art and future perspectives / Q. Bai, P. Wang, K. Cheng, L. Zhao, Y. Zhang // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.02.022>
6. Antonialli A. Í. S. Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling / A. Í. S. Antonialli, A. E. Diniz, R. V. Pederiva // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50, No. 1. – P. 65–74. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.09.006>.
7. Kurpiel S. Evaluation of the vibration signal during milling vertical thin-walled structures from aerospace materials / S. Kurpiel, K. Duda, W. Stachurski, M. Kłonica // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 14. – P. 6398. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s23146398>.
8. Balytska N. O. Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling / N. O. Balytska, O. O. Tomashevskiy, V. A. Shadura // *Journal of Engineering Sciences*. – 2025. – Vol. 12(1). – P. A20–A27. – DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a3).
9. Томашевський О. О. Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу / О. О. Томашевський, Н. О. Балицька, О. І. Прилипко // *Технічна інженерія*. – 2024. – № 1(93). – С. 81–88. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-81-88).
10. Балицька Н. О. Порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах на основі скінченно-елементного моделювання / Н. О. Балицька, О. О. Томашевський // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. – 2025. – Вип. 351(3.1). – С. 35–43. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-4>.
11. Aramcharoen A. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel / A. Aramcharoen, P. T. Mativenga // *Precision Engineering*. – 2009. – Vol. 33. – P. 402–407. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>.
12. Bissacco G. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications / G. Bissacco, H. Hansen, L. De Chiffre // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 167. – P. 201–207. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029>.
13. Barnabas B. A review on micro-milling: recent advances and future trends / B. Barnabas, G. Norbert, T. Marton, J. Davim // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 112. – P. 655–684. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06445-w>.
14. Jun M. B. G. Investigation of the dynamics of microend milling – Part I: model development / M. B. G. Jun et al. // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2006. – Vol. 128, No. 4. – P. 893–900. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2193546>.
15. Shi Y. Chatter frequencies of micromilling processes: influencing factors and online detection via piezoactuators / Y. Shi, F. Mahr, U. von Wagner, E. Uhlmann. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2012. – Vol. 56. – P. 10–16. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.12.001>.
16. Afazov S. M. Chatter modelling in micro-milling by considering process nonlinearities / S. M. Afazov et al. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2012. – Vol. 56. – P. 28–38. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.12.010>.
17. Mascardelli B. A. Substructure coupling of microend mills to aid in the suppression of chatter / B. A. Mascardelli, S. S. Park, T. Freiheit // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2008. – Vol. 130, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2816104>.
18. Park S. S. Robust chatter stability in micro-milling operations / S. S. Park, R. Rahnama // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 59, No. 1. – P. 391–394. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.023>.
19. ISO 23515:2022. Titanium and titanium alloys – Designation system. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.iso.org/standard/75871.html?utm_source=chatgpt.com.
20. FrezyCNC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.lt/oqxuvw> (дата звернення: 17.01.2026).

References

1. Tomashevskiy O. O. Protsees mikrofrezeruvannya metaliv i splaviv: analitychnyi ohliad / O. O. Tomashevskiy, N. O. Balytska // *Tekhnichna inzheneriia*. – 2023. – No. 2(92). – S. 74–88. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88).
2. Camara M. A. State of the art on micromilling of material: a review / M. A. Camara, J. C. Rubio Campos, A. M. Abrao, J. P. Davim // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2012. – Vol. 28. – P. 673–685. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60115-7](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60115-7).
3. Cheng K. Micro-cutting: fundamentals and applications / K. Cheng, D. Hou. – Chichester : Wiley & Sons, 2013. – 368 p.
4. Jin X. Chatter stability model of micro-milling with process damping / X. Jin, Y. Altintas // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2013. – Vol. 135, No. 3. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4024038>.
5. Bai Q. Machining dynamics and chatters in micro-milling: A critical review on the state-of-the-art and future perspectives / Q. Bai, P. Wang, K. Cheng, L. Zhao, Y. Zhang // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.02.022>.
6. Antonialli A. Í. S., Diniz A. E., Pederiva R. V. Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling / A. Í. S. Antonialli, A. E. Diniz, R. V. Pederiva // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50, No. 1. – P. 65–74. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.09.006>.
7. Kurpiel S. Evaluation of the vibration signal during milling vertical thin-walled structures from aerospace materials / S. Kurpiel, K. Duda, W. Stachurski, M. Kłonica // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 14. – P. 6398. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s23146398>.
8. Balytska N. O. Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling / N. O. Balytska, O. O. Tomashevskiy, V. A. Shadura // *Journal of Engineering Sciences*. – 2025. – Vol. 12(1). – P. A20–A27. – DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a3).
9. Tomashevskiy O. O. Skinchenno-elementne modelivuvannya protsesu mikrofrezeruvannya nitalolu / O. O. Tomashevskiy, N. O. Balytska, O. I. Prylypko // *Tekhnichna inzheneriia*. – 2024. – No. 1(93). – S. 81–88. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-81-88).
10. Balytska N. O. Porivnialnyi analiz syl i temperatur rizання pry mikrofrezeruvanni splaviv NiTi v austenitnomu ta martensytnomu fazovykh stanakh na osnovi skinchenno-elementnoho modelivuvannya / N. O. Balytska, O. O. Tomashevskiy // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. – 2025. – Iss. 351(3.1). – P. 35–43. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-4>.
11. Aramcharoen A. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel / A. Aramcharoen, P. T. Mativenga // *Precision Engineering*. – 2009. – Vol. 33. – P. 402–407. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>.
12. Bissacco G. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications / G. Bissacco, H. Hansen, L. De Chiffre // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 167. – P. 201–207. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029>.
13. Barnabas B. A review on micro-milling: recent advances and future trends / B. Barnabas, G. Norbert, T. Marton, J. Davim // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 112. – P. 655–684. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06445-w>.
14. Jun M. B. G. Investigation of the dynamics of microend milling – Part I: model development / M. B. G. Jun et al. // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2006. – Vol. 128, No. 4. – P. 893–900. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2193546>.
15. Shi Y. Chatter frequencies of micromilling processes: influencing factors and online detection via piezoactuators / Y. Shi, F. Mahr, U. von Wagner, E. Uhlmann, // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2012. – Vol. 56. – P. 10–16. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.12.001>.
16. Afazov S. M. Chatter modelling in micro-milling by considering process nonlinearities / S. M. Afazov et al. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2012. – Vol. 56. – P. 28–38. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.12.010>.
17. Mascardelli B. A. Substructure coupling of microend mills to aid in the suppression of chatter / B. A. Mascardelli, S. S. Park, T. Freiheit // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2008. – Vol. 130, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2816104>.
18. Park S. S. Robust chatter stability in micro-milling operations / S. S. Park, R. Rahnama // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 59, No. 1. – P. 391–394. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.023>.
19. ISO 23515:2022. Titanium and titanium alloys – Designation system. [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.iso.org/standard/75871.html?utm_source=chatgpt.com.
20. FrezyCNC [Electronic resource]. – Mode of access: <https://surl.lt/oqxuvw> (accessed: 17.01.2026).