



Метод побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Частина 2: Побудова діаграм

О. О. Штегін¹⁾

¹⁾ Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

Article info:

Paper received:

29 March 2015

The final version of the paper received:

09 September 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ shtegin@gmail.com

В цій статті запропонований напіваналітичний метод побудови діаграм динамічної сталості для висхідної та низхідної обробок сферичною кінцевою фрезою поверхні, нахиленої під деяким кутом. У статті наведені результати експериментальних досліджень для апробації методу. Дослідження проводилися для висхідної пазової обробки поверхні, нахиленої під кутами 30 та 45°. Результати підтвердили дієвість методу в невеликому (1,5–2 рази) діапазоні зміни швидкості різання. Це пов'язано з тим, що при істотних змінах швидкості різання мають місце значні зміни сили різання. Також у даній статті доведено, що процес обробки поверхні з меншим кутом нахилу залишається сталим при більших значеннях радіальної глибини різання. На нашу думку, це пов'язано з багатьма факторами, зокрема більшим кутом контакту при обробці менш похилих поверхонь, що призводить до меншої переривчастості процесу різання. Також при обробці поверхонь, нахилених під меншим кутом, має місце менший вплив радіальної складової сили різання, що призводить до відтискання кінцевої фрези від тіла заготовки.

Ключові слова: вібрації під час різання, динамічна сталість, діаграми сталості, сферичні фрези, верстати з ЧПК, кінцеве фрезерування.

ВСТУП

Сьогодні завдяки розвитку обчислювальної техніки дедалі більше досліджується динамічна сталість процесу обробки різанням. Прогностичний підхід до визначення умов сталого різання дозволяє запобігти виникненню вібрацій під час обробки, що, у свою чергу, дозволяє забезпечити вищу якість обробки і стійкість різального інструменту без збільшення собівартості обробки та зниження її продуктивності на відміну від застосування різних механізмів віброгасіння тощо. Таке прогнозування забезпечується використанням теорії діаграм сталості, запропонованої в 60-х роках ХХ ст. спочатку для точіння [0, 2, 3], а потім і для фрезерування [4, 5, 6].

На цей час гостро стоїть питання забезпечення сталої обробки деталей із просторово-складною геометрією сферичними кінцевими фрезами. Вирішення цього питання потребує розроблення завершеної теорії діаграм сталості для всіх випадків обробки просторово-складних поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Це питання висвітлюється у працях [7, 8, 9, 10].

У першій частині [11] даної праці було розглянуто вихідні дані, необхідні для побудови діаграм сталості для обробки поверхонь, нахилених під різним кутом. У цій праці, що є другою частиною, запропонований безпосередньо метод побудови діаграм сталості на основі вихідних даних, описаних в [11]. Та-

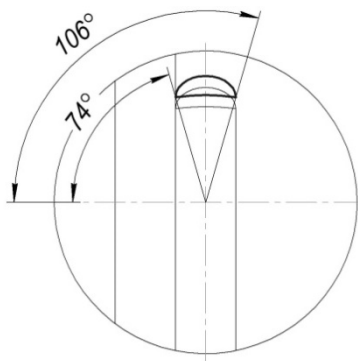
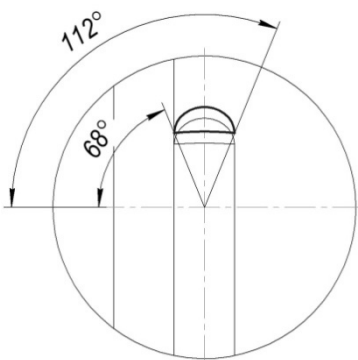
кож у даній праці наведені результати експериментальних досліджень для певних випадків висхідної обробки нахиленої під різними кутами поверхні.

МЕТОД ПОБУДОВИ ДІАГРАМ

Основною особливістю запропонованого методу є те, що він дозволяє побудувати діаграми динамічної сталості для процесу обробки сферичною кінцевою фрезою поверхні, нахиленої під деяким кутом φ_a . У працях інших авторів, зокрема в [7], не враховується істотна зміна кута контакту фрези та заготовки при зміні радіальної глибини різання в процесі обробки похилої поверхні. У той самий час ми у праці [12] показали, що навіть незначна зміна радіального припуску призводить до істотної зміни геометрії плями контакту, зокрема зміни кута контакту ϕ_{cont} , який обмежується кутами врізання та виходу $[\phi_{st}; \phi_{ex}]$. Це, у свою чергу, вносить такі корективи у періодичність дії сили різання, якими не можна знехтувати.

Для прикладу наведемо розраховані за формулами, запропонованими в [11, 12], вихідні дані для висхідної пазової обробки поверхні, нахиленої під кутом $\varphi_a = 30^\circ$, сферичною кінцевою фрезою діаметром 10 мм (таблиця 1).

Таблиця 1

φ_a	$t_r, \text{мм}$	$a_e, \text{мм}$	ϕ_{st}	ϕ_{ex}	ϕ_{cont}	Пляма контакту фрези та заготовки
30°	0,05	1,41	74°	106°	32°	
	0,10	1,99	68°	112°	44°	

Зазначимо, що в даному випадку розглядається саме пазова обробка по висхідній із міркувань того, що реалізація експериментальних досліджень при ній потребує значно меншого часу на підготовку тестів. В інших статтях висвітлюється також зустрічна та попутна обробки.

На осі абсцис діаграми динамічної сталості відкладаються значення частоти обертання шпинделя, а на осі ординат – значення глибини різання. Для системи з одним ступенем вільності, зображеної на рис. 1, граничні значення осевої глибини різання t_{lim} , при якій процес обробки залишається стабільним, можуть бути визначені [5] за такими формулами:

$$t_{lim} = \frac{2\pi}{z a_{yy} K_t \Re[G_{yy}(j\omega_c)]}, \quad (1)$$

$$a_{yy} = \frac{1}{2} [\cos 2\phi - 2K_r \phi + K_r \sin 2\phi] \phi_{st}^{\phi_{ex}}. \quad (2)$$

У рівняннях (1) та (2): z – кількість зубів фрези; a_{yy} – матриця динамічних коефіцієнтів у напрямку осі подачі (рух подачі виконується вздовж осі y); K_t – питома тангенціальна складова сили різання, Н/мм²; K_r – питома радіальна складова сили різання (безрозмірна); $\Re[G_{yy}(j\omega_c)]$ – дійсна частина передавальної функції $G_{yy}(j\omega_c)$ [9]:

$$\Re[G_{yy}(j\omega_c)] = \frac{1}{k} \frac{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2}. \quad (3)$$

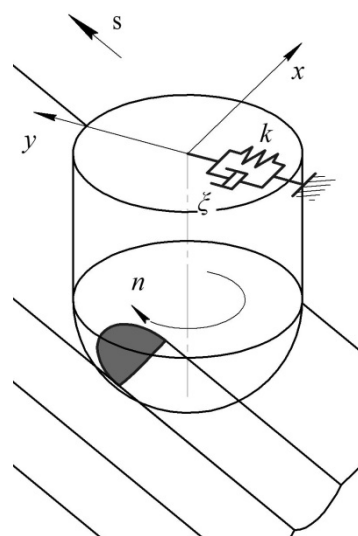


Рисунок 1 – Система з одним ступенем вільності

У рівнянні (3) для визначення передавальної функції: k – динамічна жорсткість системи; ω_c – час-

тота вібрацій; ω_n – частота власних коливань; ξ – демпфування системи.

Під час побудови діаграм сталості для процесу обробки кінцевою фрезою зі сферичним торцем необхідно перейти від осьової глибини різання t до радіальної глибини різання t_r , як це зображено на рис. 2.

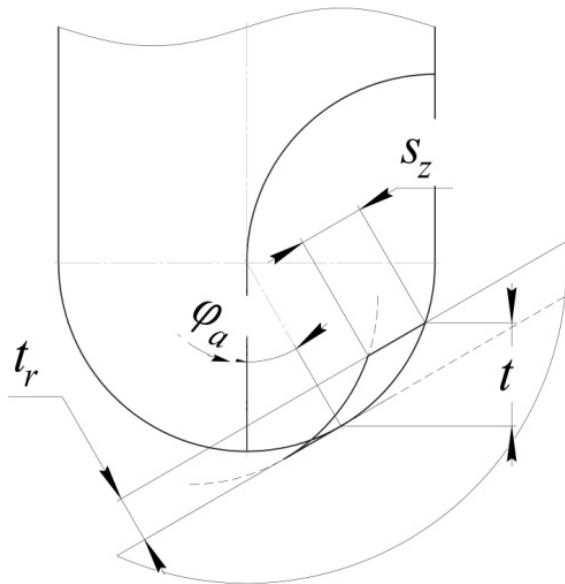


Рисунок 2 – Перехід від осьової глибини різання t до радіальної глибини різання t_r .

Цей перехід для сферичної кінцевої фрези з радіусом r можна здійснити за формулою

$$t_r = r \left(1 - \cos \left(\arccos \left(\cos \varphi_a - \frac{t}{r} \right) - \varphi_a \right) \right). \quad (4)$$

Як вже зазначалося, зміна радіальної глибини різання призводить до зміни кута контакту фрези та

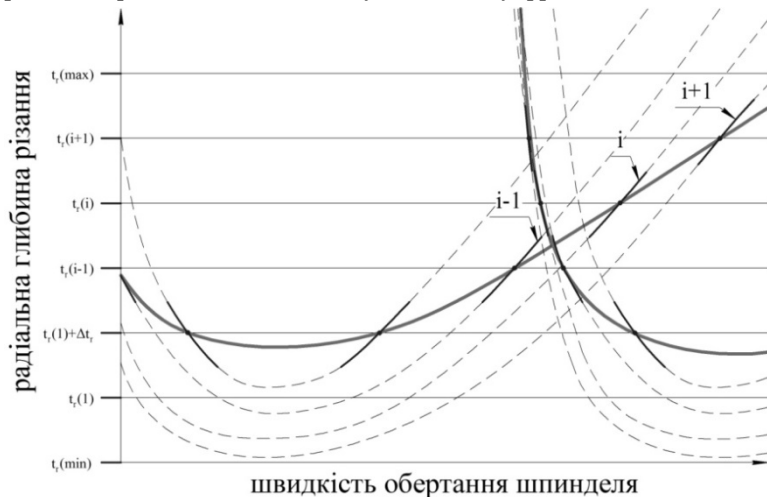


Рисунок 3 – Побудова діаграми сталості для різних значень радіальної глибини різання

заготовки. Іншими словами, діаграма сталості, побудована для певного $t_r(i)$, є справедливою лише для даного значення змінної t_r .

Щоб врахувати цей ефект та держати можливість будувати діаграми сталості для змінної плями контакту, ми запропонували такий напіваналітичний метод.

Перш за все необхідно вибрати діапазон значень радіальної глибини різання $[t_r(\min); t_r(\max)]$ для якого виконуватиметься обчислення умов сталої обробки.

Після цього необхідно обрати крок Δt_r , з яким виконуватиметься послідовне варіювання всіх значень радіальної глибини різання в межах зазначеного діапазону. Чим меншим буде цей крок, тим більш точною буде одержана діаграма динамічної сталості.

Наступною дією необхідно провести обчислення граничних значень радіальної глибини різання $t_{r,lim}$ послідовно для всього діапазону із заданим кроком, а також відповідних їм значень швидкості обертання шпинделя.

Так, i -та діаграма (рис. 3), побудована для кута контакту $\phi_{cont}(i)$, що відповідає певному значенню $t_r(i)$, є справедливою в межах значень $t_r(i) \pm \frac{1}{2} \Delta t_r$.

Діаграма $(i+1)$, побудована для кута контакту $\phi_{cont}(i+1)$, що відповідає значенню $t_r(i) + \Delta t_r$, є справедливою в межах значень $t_r(i+1) \pm \frac{1}{2} \Delta t_r$.

Діаграма $(i-1)$, побудована для кута контакту $\phi_{cont}(i-1)$, що відповідає значенню $t_r(i) - \Delta t_r$, є справедливою в межах значень $t_r(i-1) \pm \frac{1}{2} \Delta t_r$.

Таким чином, виконавши відповідні дії для всього діапазону значень радіальної глибини різання, одержимо масив точок із масивів точок, що утворює загальну діаграму, з певною точністю справедливою для кожного зі значень діапазону.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ

Для апробації методу ми провели експериментальні дослідження для висхідної пазової обробки двох заготовок – відповідно з кутами нахилу $\varphi_{a,1} = 30^\circ$ та $\varphi_{a,2} = 45^\circ$. Матеріал заготовок – конструкційна сталь марки С35 (EN 10277-2: 2008). Твердість матеріалу заготовки за стандартом складає 163 МПа.

Вимірювання сили різання при динамічно стабільній обробці пробних зразків проводили з використанням динамометра моделі Kistler 9257BA.

A

Вимірювання проводили для пробних зразків, нахилених під різними кутами φ_a (від 0 до 60° із кроком 15°) при швидкостях обертання фрези 3 900 та 4 485 об/хв. Це дозволило проаналізувати поведінку тангенціальної та радіальної складових сили різання при збільшенні швидкості різання як внаслідок зміни частоти обертання фрези, так і внаслідок зміни кута нахилу поверхні. Виміряна питома тангенціальна складова сили різання при швидкості різання 70 м/хв становила 3 300 Н/мм², при швидкості різання 80 м/хв становила 2 900 Н/мм², а при швидкості різання 90 м/хв – 2 600 Н/мм². Таке наближено лінійне зменшення тангенціальної складової сили різання при збільшенні швидкості різання відповідає відомим залежностям. Також вимірювання показали, що питома радіальна складова сили різання є меншою за менших значень кута нахилу поверхні заготовки. Так, при $\varphi_a = 30^\circ$ коефіцієнт радіальної складової сили різання усереднено становив $K_{r,30^\circ} = -0,16$, а при $\varphi_a = 45^\circ$ – відповідно $K_{r,45^\circ} = -0,25$.

ПОБУДОВА ДІАГРАМ

Одержані в програмі MATLAB за наведеним методом діаграми динамічної сталості для висхідної пазової обробки з кутами $\varphi_a = 30^\circ$ та $\varphi_a = 45^\circ$ зображені, на рис. 4.

Під час побудови діаграм були вибрані такі діапазони значень для досліджень: швидкість обертання шпинделя в межах від 4 000 до 6 000 об/хв, що повинно забезпечити швидкість різання близько 60-130 м/хв; радіальна глибина різання від 0 до 0,5 мм із кроком 0,005 мм. Асимптоти визначаються при

значеннях швидкості обертання шпинделя 4 240 та 5 088 об/хв, що є кратними частоті власних коливань фрези.

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Під час проведення експериментів процес різання здійснювався зі сталим значенням подачі для всіх виконаних тестів – 0,14 мм/зуб. Радіальна глибина різання та відповідні їй значення швидкості різання були визначені за характерними точками на прогнозованих діаграмах сталості.

Експериментальна установка зображена на рис. 5. Система «приспосовування-інструмент-деталь» (1) вміщує в себе двозубу сферичну кінцеву фрезу Ø10 мм моделі CoroMill 216 R216-10A16-050 зі змінними твердосплавними пластинами R216-10 02 E-M 1010 фірми Sandvik Coromant (2), затиснену в патроні, та лещата зі сталевую заготовкою (3) з робочою поверхнею, нахиленою під деяким кутом φ_a . Лазерний доплерівський віброметр (ЛДВ) моделі LDV Ometron VH 300+ (4) випромінює лазерний промінь (9) та сприймає відбитий у деякій точці (5) сферичної кінцевої фрези промінь. У процесі того, як сферична кінцева фреза зрізує припуск (8) з поверхні заготовки, виникають вібрації інструменту. Віброметр сприймає вібрації фрези як зміну частоти коливань відбитого від фрези лазерного променя. В аналого-цифровому перетворювачі (6) аналоговий сигнал перетворюється на цифровий та потрапляє до бази даних ноутбука (7). Після цього, виконуючи спектральний та частотно-часовий аналізи коливань у програмному середовищі PULSE LabShop (v. 7.0), визначається, чи мали місце коливання фрези з частотою, близькою до частоти власних коливань, і чи були вони домінуючими в часі.

Таким чином, робиться висновок про динамічну сталість процесу обробки із заданими умовами: процес обробки може

бути динамічно сталим, динамічно несталим або бути на межі динамічної сталості.

Для гарантованого забезпечення умов, за яких виникатимуть вібрації, довжина вильоту фрези з патрона становила $l = 10d$.

Виміряна частота власних коливань фрези ω_n становила 848 Гц. При цьому коефіцієнт загасання становила $\xi = 0,03$, а розрахована динамічна жорсткість фрези k – 1 126 Н/мм.

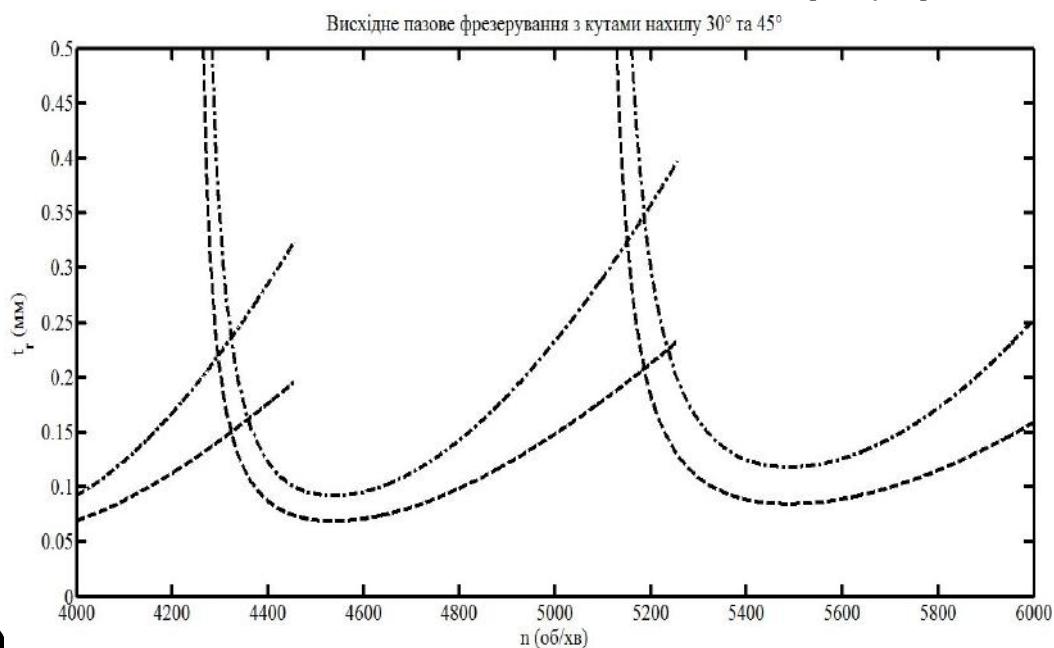


Рисунок 4 - Діаграма сталості для пазової висхідної обробки заготовок з поверхнями, нахиленими під кутами

$\varphi_a = 30^\circ$ (—) та $\varphi_a = 45^\circ$ (---)

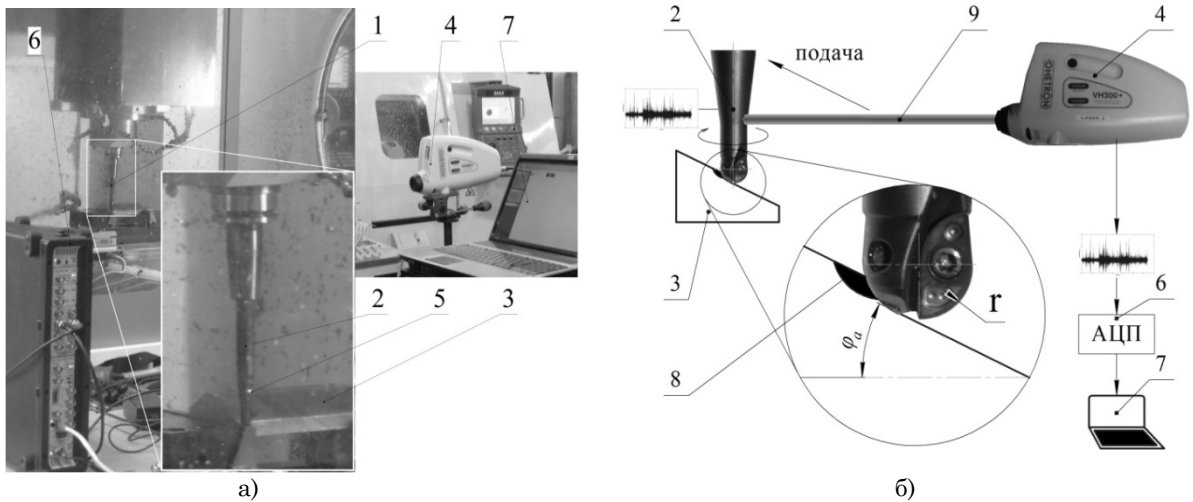


Рисунок 5 - Експериментальна установка: а) фотографія установки; б) схема установки

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

На рис. 6 та 9 наведені результати проведених тестів для заготовок із кутами нахилу відповідно $\varphi_a = 30^\circ$ та $\varphi_a = 45^\circ$. На рис. 7 подані спектри коливань для деяких тестів під час обробки заготовки з кутом нахилу $\varphi_a = 30^\circ$. На рис. 8 зображено частотно-часове відображення коливань фрези за умов динамічної сталості; спектр коливань для даного випадку наведений на рис. 7 (а). На рис. 6 та 9 позначки \times відповідають несталій обробці, позначки \blacktriangledown – гранично сталій, позначки \bullet – сталій обробці.

Із рис. 7 б бачимо, що в спектрі коливань домінують частоти, кратні частоті проходження зуба фрези, в той час як на рис. 7. в та г значно домінує частота коливань, значення якої наближене до значення частоти власних коливань фрези. Це свідчить про динамічну несталість процесу.

Побудовані за запропонованим методом діаграми в цілому відповідають експериментальній апробації. При цьому процес висхідної пазової обробки поверхні з кутом нахилу $\varphi_a = 30^\circ$ залишається сталим при більших значеннях глибини різання, ніж при обробці поверхні з кутом нахилу

$\varphi_a = 45^\circ$. Так, зокрема, обробка заготовки з кутом нахилу $\varphi_a = 30^\circ$ зі швидкістю обертання фрези 5 000 об/хв є сталою при глибині обробки 0,20 мм (рис. 6, тест 8), у той час як обробка заготовки з кутом нахилу $\varphi_a = 45^\circ$ із тією самою швидкістю обертання є несталою при глибині обробки 0,15 мм (рис. 9, тест 2). На нашу думку, така тенденція обумовлюється збільшенням радіальної складової сили різання при збільшенні кута нахилу.

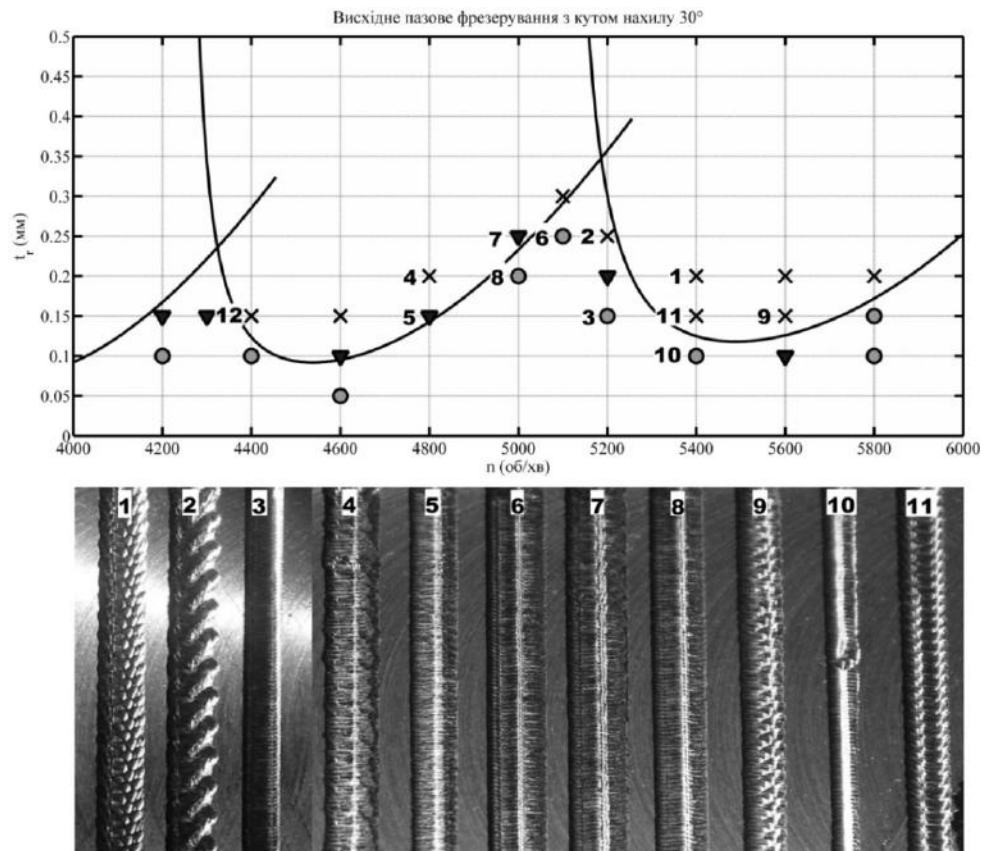


Рисунок 6 - Результати проведених експериментів для обробки заготовки з поверхнею, нахиленою під кутом $\varphi_a = 30^\circ$

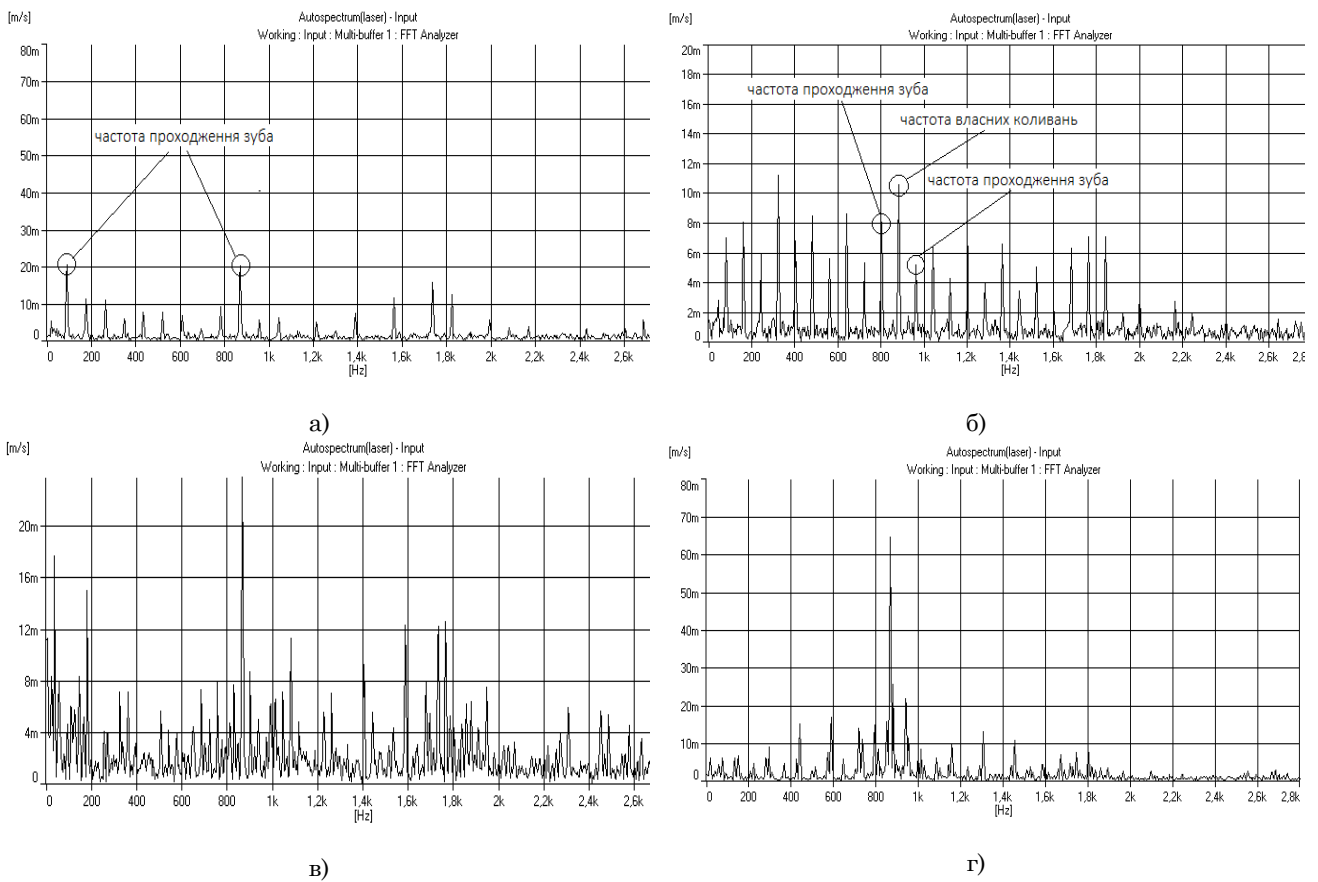


Рисунок 7 - Спектри коливань фрези для обробки заготовки з поверхнею, нахиленою під кутом $\varphi_a = 30^\circ$:
 а) стала обробка (тест 3); б) гранично стала обробка (тест 5); в) нестала обробка (тест 1);
 г) нестала обробка (тест 12);

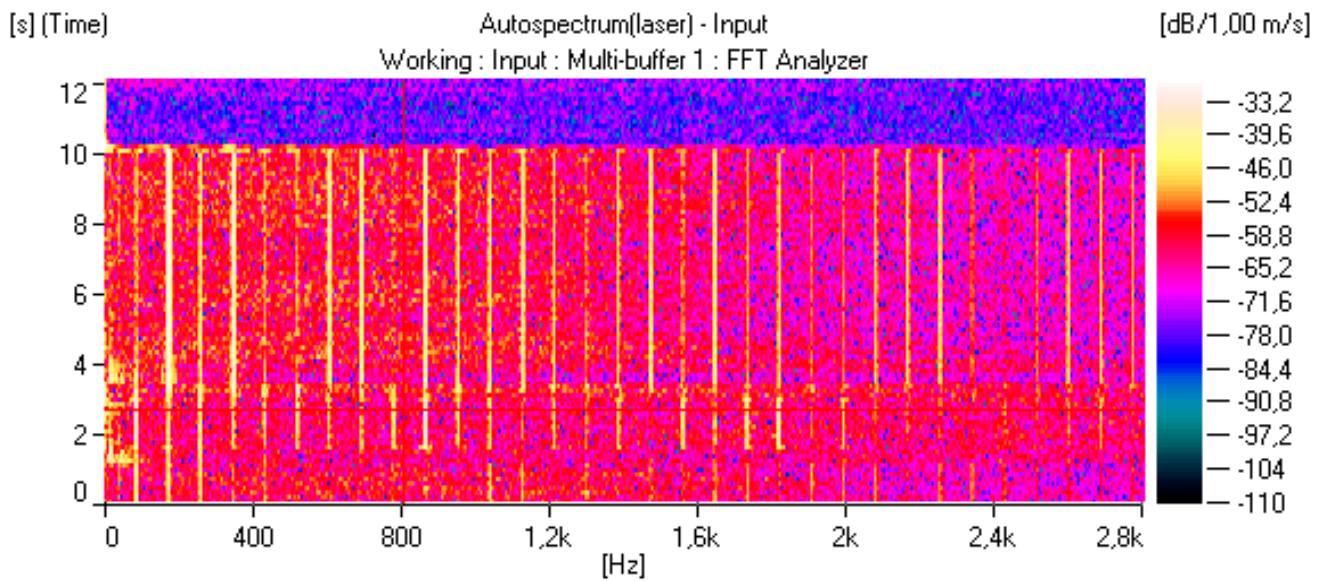


Рисунок 8 - Частотно-часове відображення коливань фрези для обробки заготовки з поверхнею, нахиленою під кутом $\varphi_a = 30^\circ$ (тест 3)

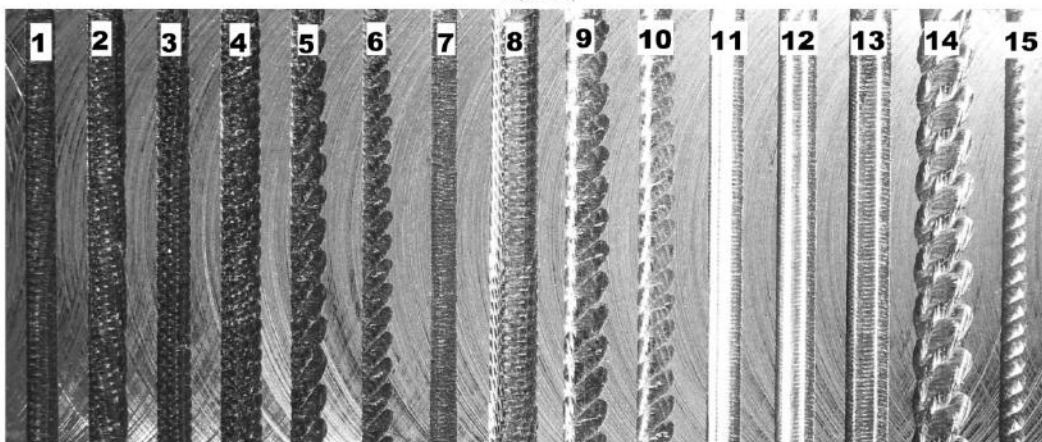
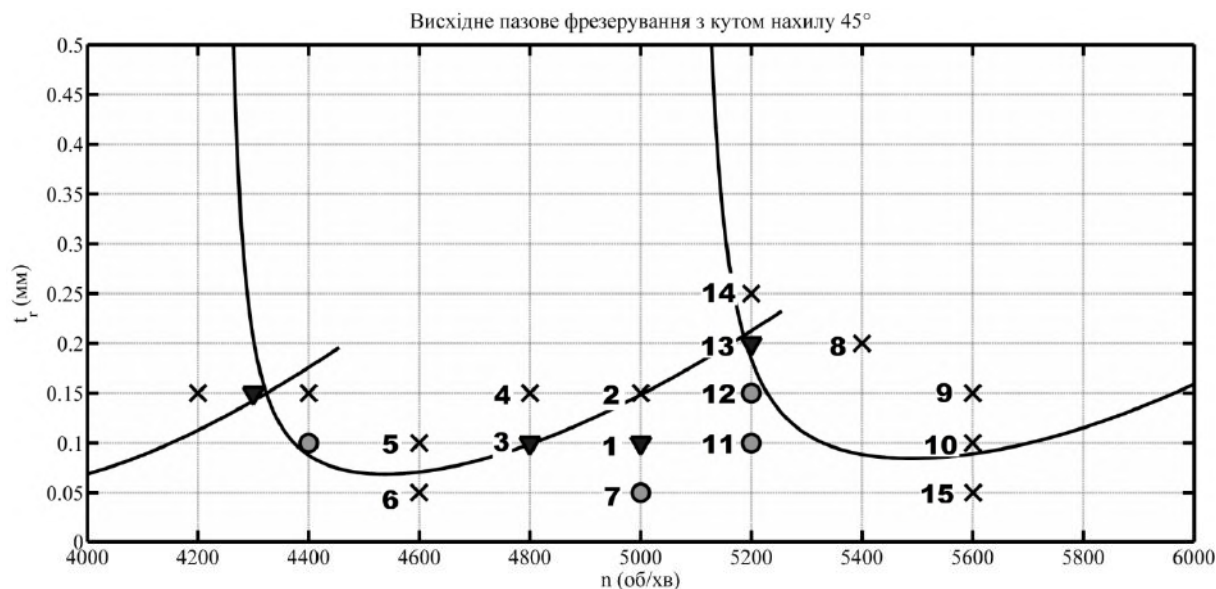


Рисунок 9 - Результати проведених експериментів для обробки заготовки з поверхнею, нахиленою під кутом $\varphi_a = 45^\circ$

Для повноти картини необхідно порівняти також висхідну та низхідну стратегії обробки, що планується зробити в подальших працях.

ВИСНОВКИ

У цій статті запропонований метод побудови діаграм динамічної сталості для висхідної та низхідної обробок сферичною кінцевою фрезою поверхні, нахиленої під деяким кутом. Також у статті наведені результати експериментальних досліджень для апробації методу. Дослідження проводилися для висхідної обробки поверхні, нахиленої під кутами 30° та 45° . Результати підтвердили дієвість методу в невеликому діапазоні зміни швидкості різання (в 1,5-2

рази). Для більш загальної картини необхідно враховувати значну зміну сили різання за істотної зміни швидкості різання (як унаслідок збільшення обертів фрези, так і внаслідок зміни кута нахилу заготовки). Доведено, що висхідна пазова обробка поверхні з меншими кутами нахилу за одних і тих самих умов залишається сталою при більших значеннях радіальної глибини різання. Це пов'язано, зокрема, з меншим впливом на збудження вібрацій радіальної складової сили різання при менших кутах. Також зв'язок вбачається у більшому куті контакту фрези та заготовки при менших кутах нахилу її поверхні, що зменшує ступінь переривчастості процесу різання.

A Method of Stability Lobes Building in Ball End Milling of Inclined Surfaces. Part 2: Lobes building

O. O. Shtehin¹⁾

¹⁾ Zhytomyr State Technological University, 103, Chernyakhovskiyi Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

A method of creating a stability lobes diagram in ball end milling of inclined surfaces. Part II: Creating a lobe diagram.

In this paper was proposed a semianalytic method of creating a stability lobes diagram for upward and downward ball end milling of surface inclined with some angle. The paper shows test results for method approbation. Tests were carried out for upward slot machining of surfaces inclined with the lead angles 30° and 45°. The results confirmed an efficacy of the method in a narrow range (1.5-2 times) of spindle speed values. It occurs due to the considerable changes of cutting force when the cutting velocity increases. Also in this paper were adduced proofs that machining process of the surfaces with smaller lead angle stays stable at greater values of radial cutting depth. In our opinion, it is related to the lot of factors, particularly greater value of the angle of contact in the case of machining of surface with the smaller lead angle value leads to decreasing of interrupted cutting. Also in the case of machining of surface with the smaller lead angle value radial component of the cutting force has lesser degree of impact and as a result there is a lesser of tool bending.

Key words: chatter in milling, stability lobes theory, chart permanence, ball end milling, CNC machining, end mill.

Метод построения диаграмм устойчивости при фрезеровании наклонных поверхностей сферическими концевыми фрезами. Часть 2: Построение диаграмм

А. А. Штегин¹⁾

¹⁾ Житомирский государственный технологический университет, ул. Черняховского, 103, г. Житомир, Украина, 10005

В данной статье предложен полуаналитический метод построения диаграмм динамической устойчивости для восходящей и нисходящей обработке сферической концевой фрезой поверхности, наклоненной под некоторым углом. В статье приведены результаты экспериментальных исследований для апробации метода. Исследования проводились для восходящей пазовой обработки поверхности, наклоненной под углами 30 и 45°. Результаты подтвердили действенность метода в небольшом (1,5-2 раза) диапазоне изменения скорости резания. Это связано с тем, что при существенных изменениях скорости резания имеют место значительные изменения силы резания. Также в данной статье доказано, что процесс обработки поверхности с меньшим углом наклона остается постоянным при больших значениях радиальной глубины резания. По нашему мнению, это связано со многими факторами, в частности, большим углом контакта при обработке менее наклонных поверхностей, что приводит к меньшей прерывности процесса резания. Также при обработке поверхностей, наклоненных под меньшим углом, имеет место меньшее влияние радиальной составляющей силы резания, приводящей к отжатию концевой фрезы от тела заготовки.

Ключевые слова: вибрации при резании, динамическая устойчивость, диаграммы постоянства, сферические фрезы, станки с ЧПУ, концевое фрезерование.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tobias S. A. Theory of regenerative machine tool chatter / S. A. Tobias, W. Fishwick //The engineer. – 1958. – Т. 205. – № 7. – С. 199-203.
2. Tobias S. A. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions / S. A. Tobias, W. Fishwick // Trans. ASME. – 1958. – Т. 80. – № 2. – С. 1079-1088.
3. Tlustý J., A Method of Analysis of Machine Tool Stability / Tlustý J. // Proc. of the 6th MTDR Conference, Manchester 1965, Pergamon Press.
4. Altintas Y., Analytical prediction of stability lobes in milling / Y. Altintas, E. Budak //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 1995. – Т. 44. – № 1. – С. 357-362.
5. Budak E., Altintas Y. Analytical prediction of chatter stability in milling—part I: general formulation / E. Budak // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1998. – Т. 120. – № 1. – С. 22-30.
6. Budak E., Analytical prediction of chatter stability in milling—part II: application of the general formulation to common milling systems / E. Budak, Y. Altintas //Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1998. – Т. 120. – № 1. – С. 31-36.
7. Altintas Y. Analytical prediction of stability lobes in ball end milling / Y. Altintas et al. //Journal of manufacturing science and engineering. – 1999. – Т. 121. – № 4. – С. 586-592.
8. Ozturk E., Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes / E. Ozturk, L. Tunc, E. Budak //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Т. 49. – № 14. – С. 1053-1062.
9. Mousseigne M. et al. Predicting the dynamic behaviour of torus milling tools when climb milling using the stability lobes theory / M. Mousseigne et al. //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – Т. 65. – С. 47-57.
10. Kim S. J., Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling / S. J. Kim, H. U. Lee, D. W. Cho //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Т. 47. – № 12. – С. 1827-1838.
11. Штегин О. О., Метод побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Частина 1. Вихідні дані / О. О. Штегин // Журнал інженерних наук. - Том 1. - № 2. - 2014. - С. А 25-А 31
12. Штегин О. О., Визначення кутів врізання та виходу при обробці похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами / О. О. Штегин //Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 3(70). – С. 62-67.

REFERENCES

1. Tobias, S. A., & Fishwick, W. (1958). Theory of regenerative machine tool chatter. *The engineer*, 205 (7), 199-203.
2. Tobias, S. A., & Fishwick, W. (1958). The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions. *Trans. ASME*, 80 (2), 1079-1088.
3. Tlustý, J. (1965, September). A method of analysis of machine tool stability. In *Proceeding MTDR* (pp. 5-14).
4. Altintas, Y., & Budak, E. (1995). Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 44 (1), 357-362.
5. Budak, E., & Altintas, Y. (1998). Analytical prediction of chatter stability in milling-part I: general formulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 120 (1), 22-30.
6. Budak, E., & Altintas, Y. (1998). Analytical prediction of chatter stability in milling-part II: application of the general formulation to common milling systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 120 (1), 31-36.
7. Altintas, Y., Shamoto, E., Lee, P., & Budak, E. (1999). Analytical prediction of stability lobes in ball end milling. *Journal of manufacturing science and engineering*, 121 (4), 586-592.
8. Ozturk, E., Tunc, L. T., & Budak, E. (2009). Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49 (14), 1053-1062.
9. Mousseigne, M., Landon, Y., Seguy, S., Dessein, G., & Redonnet, J. M. (2013). Predicting the dynamic behaviour of torus milling tools when climb milling using the stability lobes theory. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 65, 47-57.
10. Kim, S. J., Lee, H. U., & Cho, D. W. (2007). Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (12), 1827-1838.
11. Shtehin, O. O. (2014). Metod pobudovy diahram stalosti pry frezeruvanni pokhlylykh poverkhon sferychnymy kintsevymy frezamy . Chastyna 1. Vykhidni dani [A Method of Stability Lobes Building in Ball End Milling of Inclined Surfaces. Part I: Initial Data.]. *Journal of engineering sciences. – Volume 1, 2, A 25-A 31* [in Ukrainian].
12. Shtehin, O. O. (2014). Vyznachennya kutiv vrizannya ta vykhodu pry obrobsi pokhlylykh poverkhon sferychnymy kintsevimi frezamy [Definition of start and exit angles in ball end milling of inclined surfaces]. *Visnyk ZHDTU – Reporter of ZSTU*, 3 (70), 62-67 [in Ukrainian].