



Метод побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Частина 1. Вихідні дані

О. О. Штегін¹⁾

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

Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

11 November 2014

13 December 2014

08 January 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ shtegin@gmail.com

В роботі, яка складається з двох частин, запропоновано метод побудови діаграм сталості для обробки похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. В частині I визначаються вихідні дані, необхідні для побудови діаграм сталості. Вони включають в себе питомі складові сили різання та кути врізання та виходу. Для визначення останніх запропоновані оригінальні рівняння, які описують зміну значень кутів для різних варіацій радіальної глибини різання, величини перекриття та кута упередження. Для аналізу сталості процесу обробки сферичними фрезами похилих поверхонь запропоновано розглядати сили різання, прикладені по нормалі до шару, що зрізується. Зроблено априорне припущення, що для малих значень кутів упередження процес обробки буде більш сталим по низхідній аніж по висхідній, і навпаки, при значеннях кута упередження, близьких до 90°, процес обробки буде більш сталим по висхідній. Це припущення потребує підтвердження чи спростування при аналізі діаграм сталості та експериментальних дослідженнях. В частині II описується метод побудови діаграм сталості. Також наводяться результати експериментальних досліджень на підтвердження методу.

Ключові слова: вібрації при різанні, динамічна сталість, діаграми сталості, сферичні фрези, верстати з ЧПК, кінцеве фрезерування

1. ВСТУП

Механічні коливання є невід'ємною складовою роботи будь-яких механічних систем, в тому числі і систем ВПД (верстат-приспособлення-інструмент-деталь) при обробці деталей різанням. Вібрації при різанні мають однозначно негативний вплив на кінцеву якість обробленої поверхні та стійкість різального інструменту, а також на продуктивність обробки. Тому запобігання їхньому виникненню є однією з нагальних задач технології обробки різанням. В фундаментальних працях таких вчених як Н. А. Дроздов [1], А. И. Каширин [2], А. П. Соколовский [3], В. С. Штейнберг [4] викладено сучасне розуміння першопричин виникнення вібрацій при різанні. В зазначених роботах доведено [1,2,3], що головною складовою вібрацій при різанні, є автоколивання динамічної системи.

Дослідження умов виникнення вібрацій здійснюється з використанням теорії динамічної сталості руху (теорії діаграм сталості – англ. *stability lobes theory*). Фундамент теорії був закладений О. М. Ляпуновим, який в загальному випадку описав [5] умови сталості динамічної системи. Можливість застосування теорії діаграм сталості для дослідження вібрацій при різанні були показані в роботах таких вчених, як М. К. Das [6,7], S. A. Tobias [8,9], J. Tlustý [10,11], Y. Altıntaş [12], E. Budak [13,14] та ін. Серед українських вчених, які займаються теорією динамічної стійкості, варто згадати Ю. М. Внукова,

В. О. Залугу, Д. В. Криворучко, С. С. Ємельяненко. Так, С. С. Ємельяненко першим запропонував [20] враховувати запізнювання зміни сили різання як одного з головних збудників автоколивань в системі. Сьогодні теорія діаграм сталості успішно використовується для прогнозування, зокрема, кінцевого фрезерування сферичними фрезами [15,16,17,18]. Через постійне підвищення вимог до якості обробки деталей складної геометричної форми, використання нових важко обробних сплавів і т. ін. прогнозування умов сталого різання сферичними фрезами просторово-складних поверхонь є вкрай актуальним питанням. Дана робота присвячена методу побудови діаграм сталості для обробки сферичними кінцевими фрезами похилих поверхонь при різних кутах їхнього нахилу (при різних кутах випередження).

Метою даної роботи є отримання методу побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами для різних кутів нахилу поверхонь, що обробляються (кутів випередження). В частині I наводяться вихідні дані, необхідні для побудови діаграм, а саме кути врізання та виходу і питомі складові сили різання.

Діаграма сталості, які прийнято використовувати при аналізі динамічної сталості процесу різання, являє собою графік в декартовій системі координат, на вісі абсцис якого розташована швидкість обертання шпинделя, а на осі ординат – глибина різання. Крива графіку зображає граничні умови сталого процесу різання, при яких не розвиватимуться авто-

коливання динамічної системи. Нижче кривої знаходяться умови сталого різання, а вище, відповідно, несталого. Детальніше про послідовність побудови діаграм сталості йтиметься в другій частині даної роботи. В першій частині увага приділяється вихідним даним, які необхідні для побудови діаграм.

Розглянемо динамічну систему, що складається зі сферичної кінцевої фрези та заготовки. Припустимо, що жорсткість фрези є значно меншою за жорсткість заготовки. Таке припущення є актуальним для обробки деталей, що не мають тонкостінних елементів, сферичними фрезами, які мають велике співвідношення довжини вільоту l до діаметру d ($l \geq 5d$). При цьому осьова жорсткість фрези буде суттєво перевищувати її радіальну жорсткість, тому припустимим є твердження, що динамічна система матиме 2 ступені вільності (див. рис.1).

Рівняння руху такої системи матиме наступний запис:

$$[M]\{\ddot{Q}(t)\} + [C]\{\dot{Q}(t)\} + [K]\{Q(t)\} = a_p [H(t)](Q(t-\tau) - Q(t)) \quad (1)$$

Це рівняння є диференціальним рівнянням з елементом, що запізнюється. В цьому рівнянні $[M]$, $[C]$ та $[K]$ – відповідно матриці маси, демпфування та жорсткості; $\{Q(t)\}$ – вектор переміщень по осях X та Y ; a_p – осьова глибина різання; $[H(t)]$ – матриця зміни питомої сили різання; τ – різниця в часі між проходженням j -го та $(j-1)$ -го зубів фрези.

Матриця зміни питомої сили різання складається з чотирьох елементів:

$$[H(t)] = \begin{bmatrix} H_{11}(t) & H_{12}(t) \\ H_{21}(t) & H_{22}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

В рівняннях (3) $\phi_j(t)$ – кутове положення j -го зуба фрези в момент часу t ; K_t [Н/мм²] та K_r [Н/мм²] – питомі сили для визначення, відповідно, тангенціальної та радіальної складових сили різання; $g(\phi_j(t))$ – так звана функція перемикання, яка враховує, чи ріже в момент часу t j -й зуб фрези.

$$\begin{aligned} H_{11}(t) &= \sum_{j=1}^N g(\phi_j(t)) (K_t \cos(\phi_j(t)) + K_r \sin(\phi_j(t))) \sin(\phi_j(t)); \\ H_{12}(t) &= \sum_{j=1}^N g(\phi_j(t)) (K_t \cos(\phi_j(t)) + K_r \sin(\phi_j(t))) \cos(\phi_j(t)); \\ H_{21}(t) &= \sum_{j=1}^N g(\phi_j(t)) (-K_t \sin(\phi_j(t)) + K_r \cos(\phi_j(t))) \sin(\phi_j(t)); \\ H_{22}(t) &= \sum_{j=1}^N g(\phi_j(t)) (-K_t \sin(\phi_j(t)) + K_r \cos(\phi_j(t))) \cos(\phi_j(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

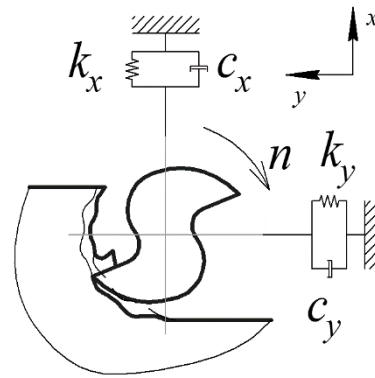


Рис. 1. Коливання кінцевої фрези як системи з двома ступенями вільності

$$\begin{cases} \phi_{st} \leq \phi_j(t) \leq \phi_{ex} \Rightarrow g(\phi_j(t)) = 1 \\ \phi_j(t) \leq \phi_{st} \vee \phi_j(t) \geq \phi_{ex} \Rightarrow g(\phi_j(t)) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2. ГЕОМЕТРІЯ ШАРУ, ЩО ЗРІЗУЄТЬСЯ, ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ СКЛАДОВИХ СИЛ РІЗАННЯ

При обробці сферичними кінцевими фрезами нахилених поверхонь виникає достатньо складна геометрія шару, що зрізується. Правильна оцінка зони прикладення сил різання при аналізі сферичного кінцевого фрезерування є необхідною умовою для точного прогнозування умов сталого різання.

На рис.2 зображено шар, що зрізується з подачею на зуб f_z , та виникаючі при цьому сили різання (радіальна складова F_r , осьова складова F_a , їхня векторна сума F_{ra} тангенціальна складова F_t розташовано перпендикулярно площині рисунка), відповідно, для висхідного фрезерування (рис. 2, а) та низхідного фрезерування (рис. 2, б).

В цій роботі запропоновано розглядати сили, що призводять до виникнення коливань фрези, не в напрямку нормалі до поверхні заготовки, а по нормалі безпосередньо до шару, що зрізується. Такий підхід виявляється виправданим при порівнянні висхідного фрезерування (позитивний кут упередження φ) та низхідного фрезерування (негативний кут упередження φ). Вектори нормалі до поверхні заготовки в обох випадках співпадають, проте принципово відрізняються напрямки векторів нормалей до шару, що зрізується. Вектори сили різання

також мають різні напрямки і різні за модулем складові. Так, для низхідного фрезерування при

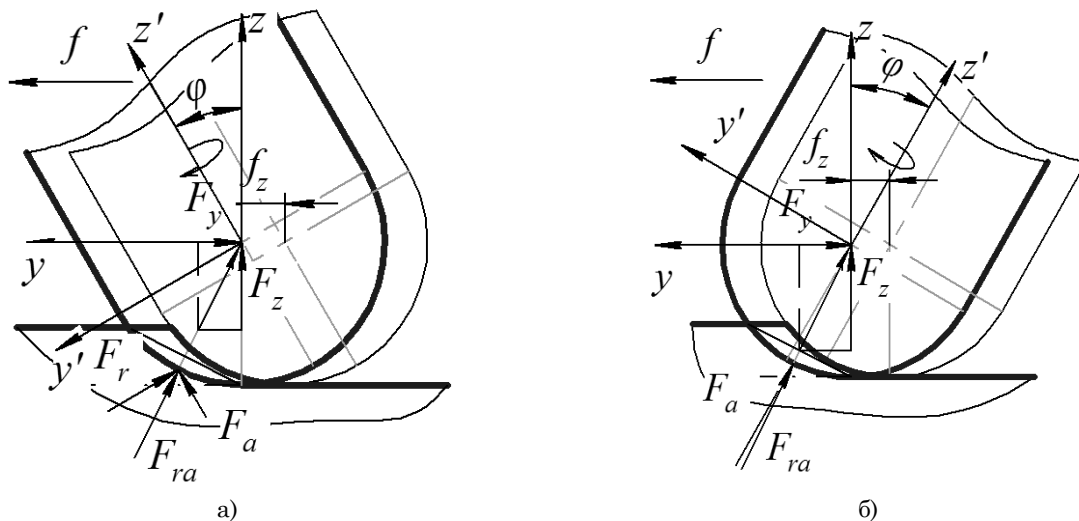


Рис. 2. Схема шару, що зрізується, при фрезеруванні сферичними фрезами

невеликих значеннях кута упередження ϕ основною складовою є осьова складова сили різання, в той час як при висхідному фрезеруванні основною складовою є радіальна складова сили різання. При значеннях кута упередження ϕ , близьких до 90° , має місце зворотній ефект.

Можна зробити апіорне припущення, що при малих значеннях кута упередження висхідне фрезерування буде менш сталим за низхідне при однакових значеннях радіальної глибини різання, і навпаки – при великих значеннях кута висхідне фрезерування буде більш сталим за низхідне.

Якщо при проведенні досліджень робочі органи верстату переміщуються по осях y' та z' (рис. 2) і вимірюються складові сили різання у відповідних напрямках, то тангенціальна F_t , радіальна F_r та осьова F_a складові сили різання при кутовому положенні фрези $\phi_j(t)$ визначатимуться як:

$$\begin{Bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \begin{vmatrix} -\cos\psi_{hl}\sin\phi_j(t) & -\cos\phi_j(t) & -\sin\psi_{hl} \\ \cos\phi_j(t) & -\sin\phi_j(t) & 0 \\ \sin\psi_{hl} & 0 & \cos\psi_{hl} \end{vmatrix} \quad (5)$$

В цьому матричному рівнянні ψ_{hl} – кут нахилу спіралі зуба для монолітних фрез або нахил пластини відносно осі фрези для фрез зі змінними пластинами. Як видно з рівняння (5), осьова складова сили різання має місце при ненульових значеннях ψ_{hl} . Втім, для оцінки сталості руху динамічної системи допустимо застосовувати систему з двома ступенями вільності.

Визначивши тангенціальну та радіальну складові сили різання, можна отримати відповідні коефіцієнти складових сили різання K_t та K_r . Оскільки вони є емпіричними та характеризують питому силу різання при перетворенні в стружку 1 мм^2 припуску, визначатимуться вони за формулами:

$$K_t = \frac{F_t(t)}{s(t)} \quad (6)$$

$$K_r = \frac{F_r(t)}{s(t)} \quad (7)$$

В цих рівняннях доцільно вести розрахунки для максимального значення миттєвої площі шару, що зрізується, $s(t)$. Знаючи значення кута врізання та швидкості обертання фрези, не становить проблеми визначити значення складових сили різання в конкретний момент часу t . Згідно рис. 3, для кута повороту фрези $\phi_j(t) = \pi/2$ миттєву площу шару, що зрізується, можна визначити як:

$$s(t) = f_z a_p \cos\psi_{hl} \quad (8)$$

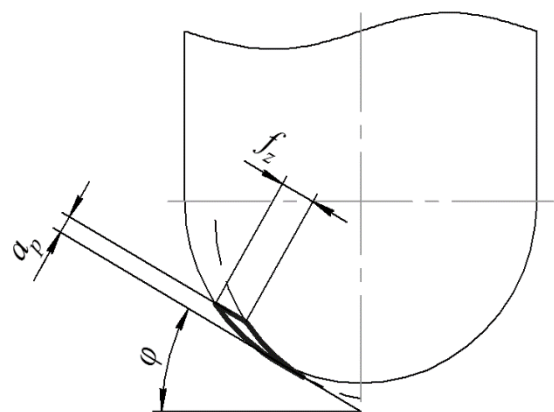


Рис. 3. Миттєва площа шару, що зрізується



3. КУТИ ВРІЗАННЯ ТА ВИХОДУ

При аналізі динаміки процесу обробки сферичними фрезами прийнято користуватись поняттям *плями контакту* для опису геометрії шару, що зрізується. Пляма контакту характеризується кутами врізання зуба фрези в тіло заготовки ϕ_{st} та кута виходу зуба фрези з тіла заготовки ϕ_{ex} (див. рис. 4).

Точне визначення значень цих кутів є необхідною умовою для прогнозування умов сталості процесу обробки. Визначати кути ϕ_{st} та ϕ_{ex} можна аналітично або шляхом комп'ютерного моделювання процесу різання.

В цій роботі запропоновано використовувати оригінальні формули для визначення кутів врізання та виходу як функцій від радіуса фрези r , кута упередження ϕ , радіального припуску на обробку a_p та величини перекриття рядків a_e [19].

В рівняннях (9а), (9б), (9в) та (9г) величина $K = 1 - a_p / r$ (див. табл. 1).

На рис. 5, а та рис. 5, б графічно продемонстровано зміну відповідно кутів врізання та виходу для різних варіацій радіальної глибини різання та кута упередження при зустрічному фрезеруванні.

Симуляція проводилась для фрези радіусом 5 мм.

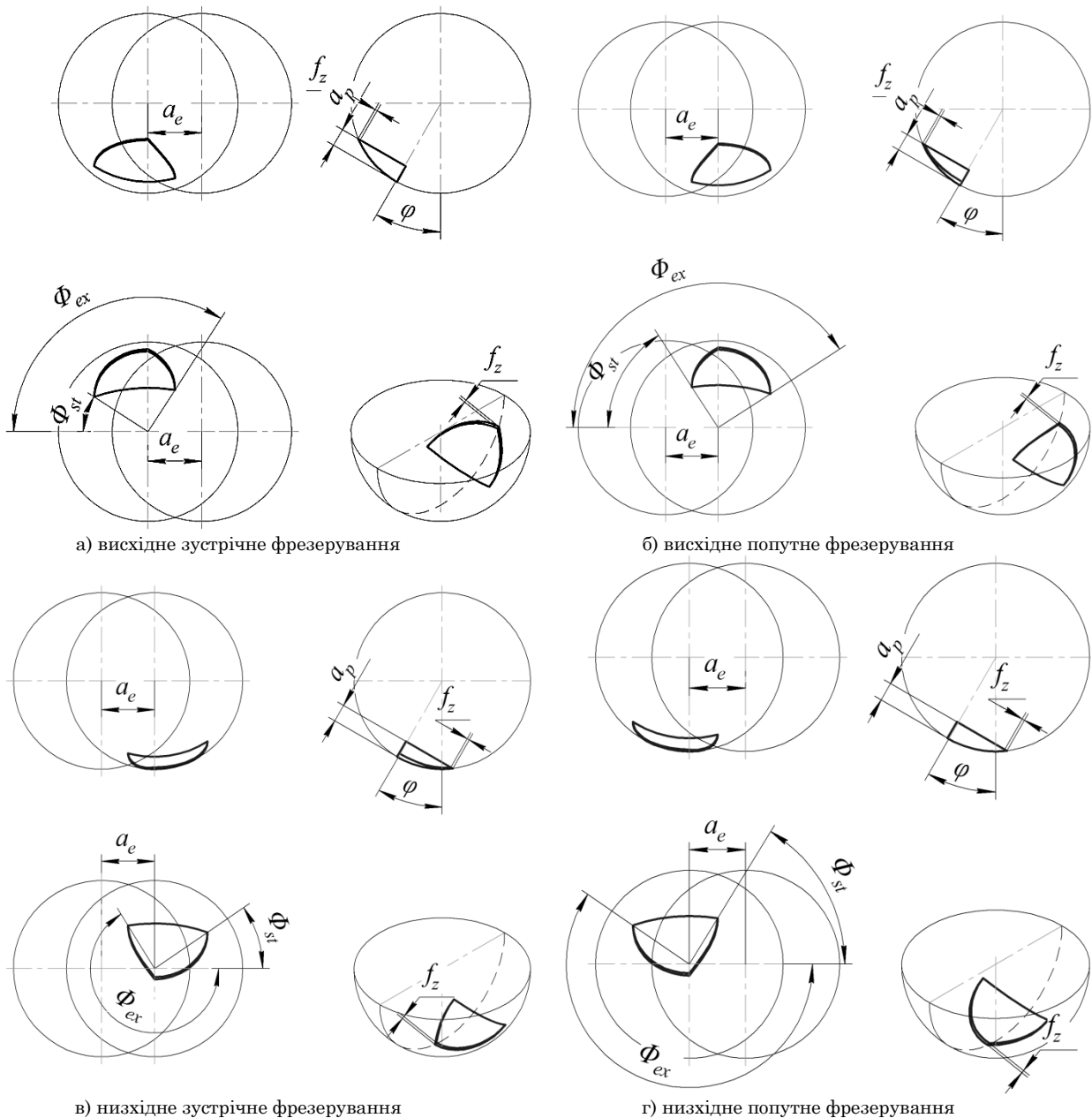


Рис. 4. Схеми для визначення кутів врізання та виходу

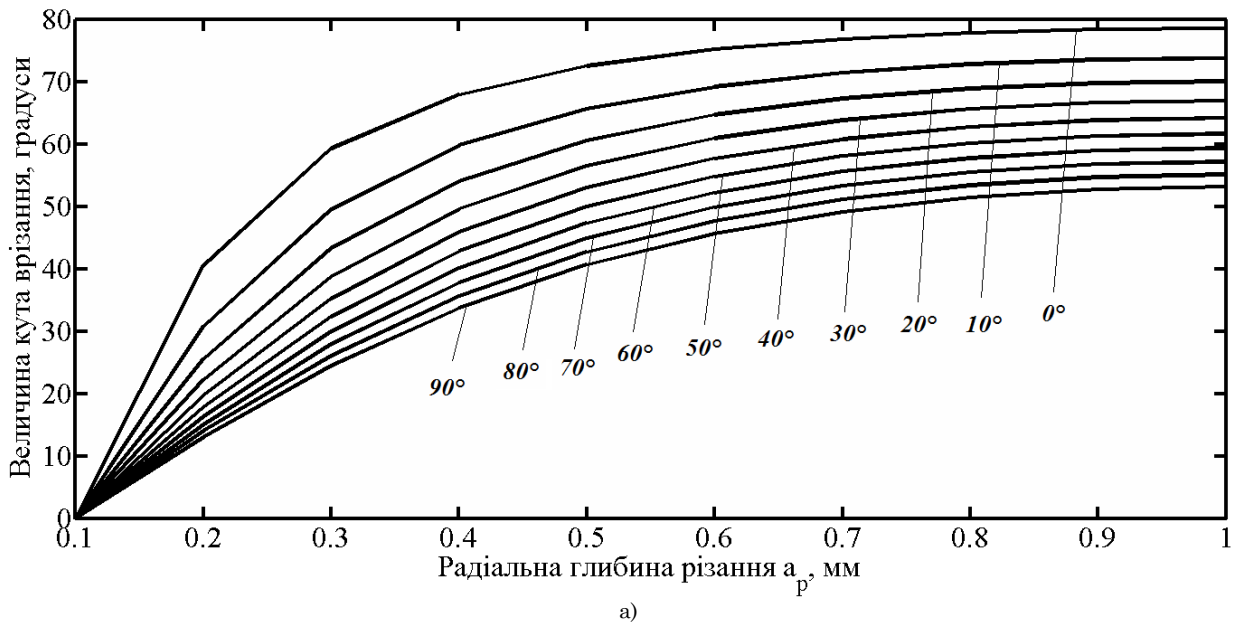
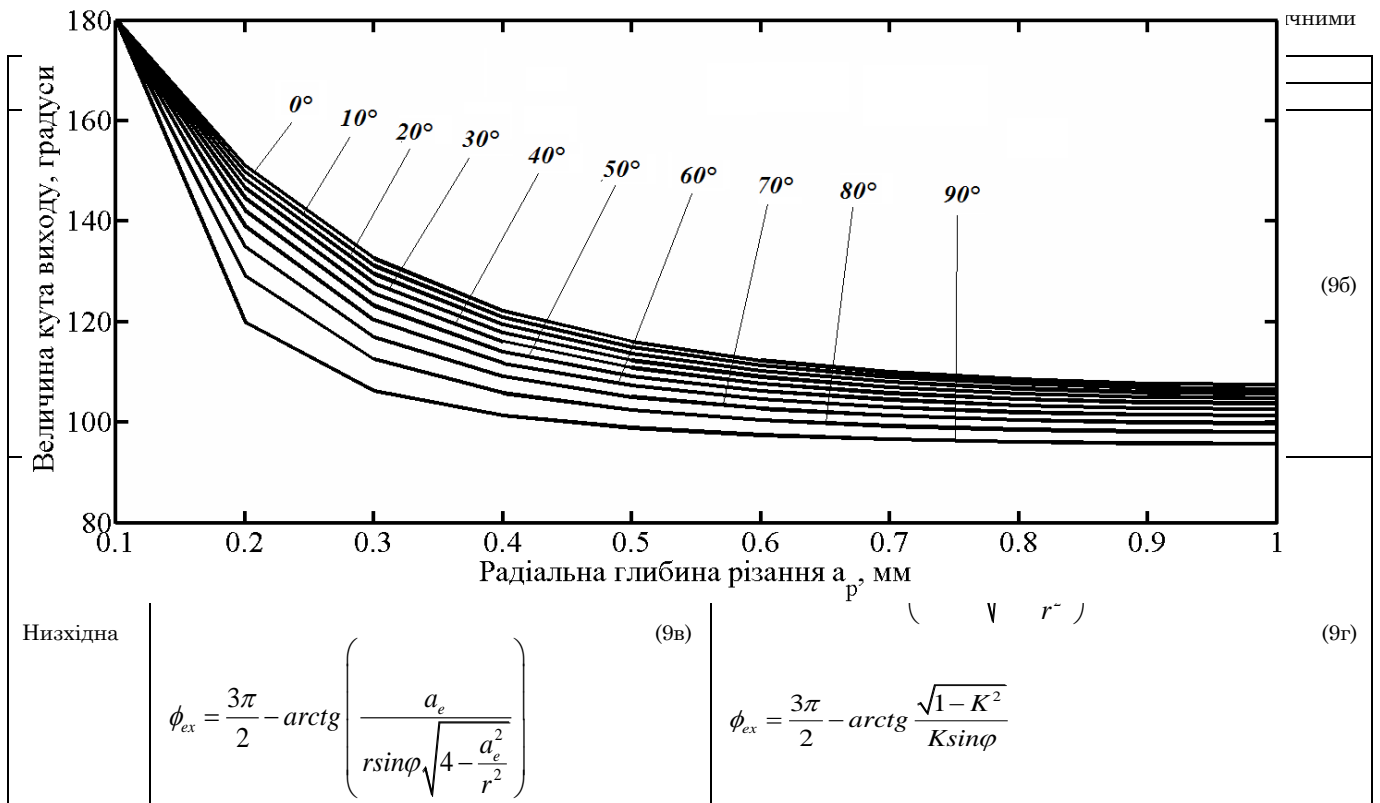
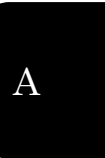


Рис. 5. Зміна кутів різання (а) та виходу (б) при зміні a_p та ϕ для висхідного зустрічного фрезерування

4. ВИСНОВКИ

В частині I цієї роботи визначаються вихідні дані, необхідні для побудови діаграм сталості процесу фрезерування похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Для визначення питомих складових сили різання запропоновано розглядати силу різання вздовж нормалі до шару, що зрізується.

Також наведені оригінальні формули для визначення кутів різання та виходу як функцій, що залежать від кута упередження ϕ , радіальної глибини різання a_p та величини перекриття рядків a_e ; графічно продемонстровано зміну значень цих кутів для різних варіацій радіальної глибини різання та кута упередження при зустрічному фрезеруванні.



A method of stability lobes building in ball end milling of inclined surfaces. Part 1. Initial data

O. O. Shtehin¹⁾

¹⁾ *Zhytomyr state technological university, 103, Chernyakhovsky str., Zhytomyr, Ukraine, 10005*

In this paper which consists of two parts, was proposed a method of stability lobes building in ball end milling of inclined surfaces. In Part I initial data necessary for stability lobes building were determined. They include specific cutting forces coefficients and angles of entrance and exit. For their determinations were proposed original equations which describe a changing of these angles for different variations of radial depth of cut and lead angle. For stability analysis of ball end milling process of inclined surfaces have been proposed to consider cutting forces along the normal to the chip cross section. A priori was made an assumption that for small values of lead angle downward machining process will be more stable than upward, and vice versa, for big values of lead angle (close to 90°) upward machining process will be more stable than downward. This assumption needs in confirmation or confutation during the stability lobes analysis and experimental investigations. In Part II was described a method of stability lobes building. Also were given results of experiments which verify this method.

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

Метод построения диаграмм устойчивости при фрезеровании наклонных поверхностей сферическими концевыми фрезами. Часть 1. Выходные данные

А. А. Штегин¹⁾

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

В работе, которая состоит из двух частей, предложен метод построения диаграмм устойчивости для обработки наклонных поверхностей сферическими концевыми фрезами. В первой части работы определяются исходные данные, необходимые для построения диаграмм устойчивости. Они включают в себя удельные составляющие силы резания и углы врезки и выхода. Для определения последних предложены оригинальные уравнения, описывающие изменение значений углов для различных вариаций радиальной глубины резания, величины перекрытия и угла предубеждения. Для анализа устойчивости процесса обработки сферическими фрезами наклонных поверхностей предложено рассматривать силы резания, прилагаемые по нормали к срезаемому слою. Сделано априорное предположение, что для малых значений углов предубеждения процесс обработки будет более устойчивым по нисходящей чем по восходящей, и наоборот, при значениях угла предубеждения, близких к 90°, процесс обработки будет более устойчивым по восходящей. Это предположение требует подтверждения или опровержения при анализе диаграмм устойчивости и экспериментальных исследованиях. Во второй части работы описывается метод построения диаграмм устойчивости. Также приводятся результаты экспериментальных исследований по подтверждению адекватности предложенного метода.

Ключевые слова: вибрации при резании, динамическая устойчивость, диаграммы устойчивости, сферические фрезы, станки с ЧПУ, конечное фрезерование

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дроздов Н. А. К вопросу о вибрациях при токарной обработке / Н. А. Дроздов // Станки и инструмент. – 1937. – № 22. – С. 10–17.
2. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании металла / А. И. Каширин. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1944. – 133 с.
3. Соколовский А. П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / А. П. Соколовский // Исслед. колебаний металлорежущих станков при резании металлов: сб. тр. – М.: Машгиз, 1958. – 120 с.
4. Штейнберг В. С. Исследование вибраций при токарной обработке металлов / В. С. Штейнберг // Вестник металлопромышленности. – 1936. – № 12–13. – С. 83–87.
5. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения (диссертация и статьи) / Ляпунов А. М., Мюнтц Х. Н., Стеклов В. – ОНТИ, Главная редакция общетехнической литературы, 1935.
6. Das M.K. The Relation Between the Static and the Dynamic Cutting Forces of Metals / M. K. Das, S. A. Tobias // International Journal of Machine Tool Design and Research, 1967. – Vol. 7, pp. 63–89.
7. Das M. K. Machine tool chatter / M. K. Das // Chartered Mechanical Engineer. – 1981. – Vol. 28. – Issue 8. – pp. 22–27.
8. Tobias S. A. Theory of regenerative machine tool chatter / S. A. Tobias, W. Fishwick // The engineer. – 1958. – Vol. 205. – Issue 7. – pp. 199–203.
9. Tobias S. A. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions / S. A. Tobias, W. Fishwick // Trans. ASME. – 1958. – Vol. 80. – Issue 2. – pp. 1079–1088.
10. Тлусты И. Автоколебания в металлорежущих станках.

Пер. с чеш / И. Тлусты. – М.: Машгиз, 1956. – 121 с.

11. Tlusty J. A Method of Analysis of Machine Tool Stability / J. Tlusty // Proc. of the 6th MTDR Conference, Manchester 1965, Pergamon Press.

12. Altintas Y. Analytical prediction of stability lobes in milling / Y. Altintas, E. Budak // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 1995. – Vol. 44. – Issue 1. – pp. 357–362.

13. Budak E., Altintas Y. Analytical prediction of chatter stability in milling – part I: general formulation / E. Budak, Y. Altintas // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1998. – Vol. 120. – Issue 1. – pp. 22–30.

14. 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. – Vol. 120. – Issue 1. – pp. 31–36.

15. Altintas Y. Analytical prediction of stability lobes in ball end milling / Y. Altintas // Journal of manufacturing science and engineering. – 1999. – Vol. 121. – Issue. 4. – pp. 586–592.

16. Ozturk E. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes / E. Ozturk, L. T. Tunc,

E. Budak // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49. – Issue 14. – pp. 1053–1062.

17. Mousseigne M. Predicting the dynamic behaviour of torus milling tools when climb milling using the stability lobes theory / M. Mousseigne // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – Vol. 65. – pp. 47–57.

18. Kim S. J. Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling / Kim S. J., Lee H. U., Cho D. W. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47. – Issue 12. – pp. 1827–1838.

19. Штегін О. О. Визначення кутів врізання та виходу при обробці похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами / О. О. Штегін // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – №. 3 (70).

20. Ємельяненко С. С. Підвищення ефективності процесу кінцевого фрезерування шляхом забезпечення динамічної стійкості технологічної системи: дис. канд. тех. наук: 05.03.01 / С. С. Ємельяненко. – Х., 2008. – 204 с.

REFERENCES

1. Drozdov N. A. (1937). Stanki i instrument – Machines and tools. Vol. 22. pp. 10-17 [in Russian]
2. Kashirin A. I. (1944). Issledovaniye vibratsiy pri rezanii metalla. Leningrad: AS USSR [in Russian]
3. Sokolovsky A. P. (1958). Vibratsii pri rabote na metallorezhushchikh stankakh. Moscow.: Mashgiz, 15-18 [in Russian]
4. Shteinberg V. S. (1936). Vestnik metallopromyshlennosti. Vol. 12-13. pp. 83-87 [in Russian]
5. Lyapunov A. M., Myuntts, H. N., Steklov, V. (1935). Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya (dissertatsiya i stati). ONTI, Glavnaya redaktsiya obshchetekhnicheskoy literatury [in Russian].
6. Das M. K., & Tobias S. A. (1967). International Journal of Machine Tool Design and Research, 7(2). pp. 63-89.
7. Das M. K. (1981). CHARTERED MECH. ENG., 28(9), 22-27.
8. Tobias S. A., & Fishwick W. (1958). The engineer, 205(7), 199-203.
9. Tobias S. A., & Fishwick W. (1958). Trans. ASME, 80(2), 1079-1088.
10. Tlusty J. (1956). Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh (Trans. from the Czech). [in Russian]
11. Tlusty J. (1965, September). In Proceeding MTDR (pp. 5-14).
12. Altintas Y., & Budak E. (1995). CIRP Annals-Manufacturing Technology, 44(1), 357-362.
13. Budak E., & Altintas Y. (1998). Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 120(1), 22-30.
14. Budak E., & Altintas Y. (1998). Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 120(1), 31-36.
15. Altintas Y., Shamoto E., Lee P., & Budak E. (1999). Journal of manufacturing science and engineering, 121(4), 586-592.
16. Ozturk E., Tunc L. T., & Budak E. (2009). International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(14), 1053-1062.
17. Mousseigne M., Landon Y., Seguy S., Dessein G., & Redonnet J. M. (2013). International Journal of Machine Tools and Manufacture, 65, 47-57.
18. Kim S. J., Lee H. U., & Cho D. W. (2007). International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(12), 1827-1838.
19. Shtehin O. O. (2014). Visnyk ZHDTU, 3(70). [in Ukrainian].
20. Yemelyanenko S. S. (2008) Pidvyshchennya efektyvnosti protsesa kintsevoho frezeruvannya shlyakhom zabezpechennya dinamichnoyi stiykosti tekhnolohichnoyi systemy [Increasing of finish milling process effectiveness by using dynamic stability providing of technological system]. Candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].