

О.О. Штегін, асист.
В.Є. Юмашев, к.т.н., доц.
Житомирський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ НАХИЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ СФЕРИЧНИМИ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ

Досліджено вплив кута нахилу поверхні, що обробляється, на динамічну сталість процесу різання. Проведено низку досліджень щодо обробки сферичною кінцевою фрезой поверхонь з різним кутом нахилу (від $7,5$ до $52,5^\circ$ з кроком $7,5^\circ$) для попутного фрезерування за висхідною та низхідною стратегіями. Результати цих експериментів показали, що фрезерування за висхідною є більш сталим при всіх значеннях кута нахилу. Це викликано меншими значеннями ефективних радіусів різального інструменту і, як наслідок, меншими значеннями швидкості різання і більшими значеннями сили різання. Під час обробки з малими кутами нахилу (до 15°) мали місце вібрації з частотою проходження зуба. Особливо це явище проявлялося при фрезеруванні за низхідною стратегією. Також було показано, що амплітуда коливань практично не збільшується при значному (в 5 разів) збільшенні радіальної глибини різання. Більше того, в деяких випадках (малий кут нахилу, низхідна стратегія) амплітуда навіть стає меншою.

Ключові слова: вібрації при різанні; сферичні кінцеві фрези; динамічна сталість; верстати з ЧПК.

Вступ. Постановка проблеми. Напівчистова та чистова (а інколи і фінішна) обробка просторово-складних поверхонь різанням здійснюється, як правило, сферичними кінцевими фрезами на верстатах з ЧПК – три-, чотири- та п'ятиосьових. При цьому динаміка процесу фрезерування сферичними кінцевими фрезами є вкрай складною через змінний миттєвий шар, що зрізується, змінну швидкість різання, а отже й сили різання при різних глибинах процесу тощо.

Теорія діаграм динамічної сталості, що розвивається вже більш як півстоліття, дозволяє взаємно оптимізувати вибір глибини різання та швидкості обертання заготовки (при точінні) або фрези (при фрезеруванні). Використання теорії діаграм динамічної сталості для різання просторово-складних поверхонь сферичними фрезами є перспективним шляхом оптимізації обробки, проте досі є недостатньо вивченим та недостатньо систематизованим через складну динаміку процесу. Особливо це стосується обробки на триосьових верстатах, коли немає можливості активно керувати кутом нахилу осі фрези по відношенню до оброблюваної поверхні. Актуальність оптимізації обробки просторово-складних поверхонь саме на триосьових фрезерних верстатах обумовлена їхньою значно меншою вартістю, порівняно з чотири- та п'ятиосьовими верстатами.

Мета роботи. Дослідити вплив кута нахилу поверхні заготовки на динамічну сталість процесу різання під час обробки похилих поверхонь сферичними фрезами при попутному різанні за висхідною та низхідною стратегіями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередніх роботах [1–4] нами було показано, що під час дослідження динамічної сталості процесу обробки похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами має враховуватися вплив зміни радіальної глибини різання і кута нахилу поверхні заготовки на кут контакту ϕ_{cont} , а також напрямок різання (попутний чи зустрічний) та стратегія обробки (низхідна чи висхідна, вздовж нахиленої поверхні чи впоперек неї). У той самий час ці характеристики процесу фрезерування впливають і на зношуваність різального інструменту. Так, наприклад, у [5] показано, що стійкість сферичної фрези при низхідному фрезеруванні є більшою, ніж при висхідному. Це все дає розуміння необхідності комплексного підходу до оптимізації процесу обробки сферичними фрезами просторово-складних поверхонь. З огляду на це, в даній роботі висвітлюється вплив кута нахилу поверхні заготовки на динамічну сталість процесу різання при попутному різанні за висхідною та низхідною.

Викладення основного матеріалу. У межах даної роботи розглянемо коливання системи «пристосування–інструмент–деталь» при попутній обробці нахиленої площини як системи з одним ступенем вільності. Іншими словами, розглядається коливання найбільш піддатливої моди системи.

Система з одним ступенем вільності. Коливальна технологічна система з одним ступенем вільності (рис. 1) є відносно простою для опису генезису коливань при обробці різанням. Однією з причин виникнення коливань під час різання, що назвали *регенеративними коливаннями*, є так зване «різання по сліду» – зняття миттєвого припуску, який має статичну складову – глибину різання та подачу на зуб і динамічну складову – різницю між дійсними координатами по осі у вершин j -го та $(j-1)$ -го зубів фрези.

Поперечне січення такого припуску постійно змінюється, що призводить до відповідних змін сил різання, які діють на технологічну систему.

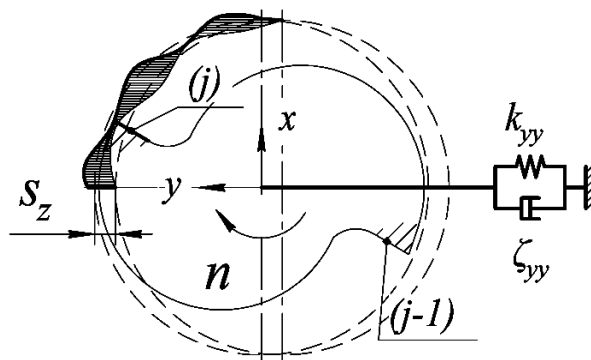


Рис. 1. Коливальна система з одним ступенем вільності

Динамічна система, що зображена на рисунку 1, характеризується динамічною жорсткістю k_{yy} та демпфуванням ζ_{yy} . У свою чергу, демпфування має пасивну складову (спричинену фізико-механічними властивостями матеріалів системи) та активну складову (спричинену пружними та пластичними процесами в зоні різання, зокрема, тертям).

Визначення активної складової демпфування є доволі складною задачею, при цьому вона є змінною в часі, тому обмежимося визначенням пасивної складової демпфування системи.

Коефіцієнт демпфування визначається як:

$$\zeta_{yy} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta_{yy}}\right)^2}}, \quad (1)$$

де $\delta_{yy} = \frac{1}{p} \ln \frac{v(t)}{v(t+pT)}$ – логарифмічний декремент коливань; p – кількість циклів затухаючих коливань;

$v(t)$ – амплітуда в момент часу t ; $v(t+pT)$ – амплітуда в момент часу $(t+pT)$; T – період коливань.

Динамічна жорсткість визначається так:

$$k_{yy} = m(2\pi f_n)^2, \quad (2)$$

де m – модальна маса коливальної системи; f_n – частота власних коливань системи. Ці параметри можуть бути визначені модальним аналізом, наприклад, у SolidWorks Simulation або в іншому подібному програмному середовищі. Зауважимо, що всі розрахунки наводяться для першої моди як найбільш піддатливої. Жорсткість системи змінюється залежно від того, в якій точці вздовж осі z прикладена сила.

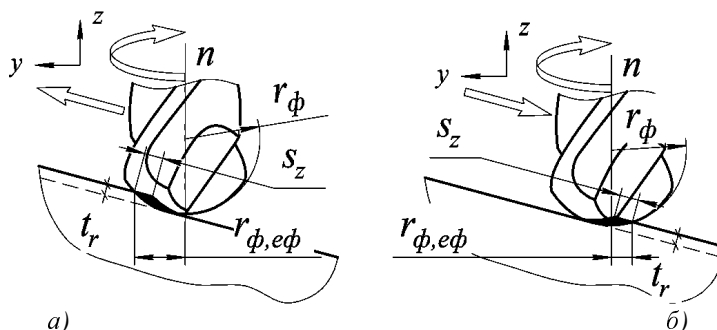


Рис. 2. Ефективний радіус фрези при висхідному та низхідному фрезеруванні

Як видно з рисунка 2, за всіх однакових умов (подача на зуб, глибина різання, кут нахилу поверхні) значно відрізнятиметься ефективний радіус фрези $r_{\phi,ef}$ при висхідній (а) та низхідній (б) стратегії

обробки. При висхідній обробці ефективний радіус фрези є більшим за будь-яких значень кута нахилу поверхні, що обробляється, аніж при низхідній. У той самий час за певних значень радіальної глибини різання та кута нахилу поверхні, що легко розраховуються, в обробці братиме участь ділянка різальної кромки поблизу осі фрези. У цій зоні швидкість різання сягатиме 0, а отже процес різання відсутній, натомість відбувається пластична деформація припуску.

Кут контакту фрези та заготовки ϕ_{cont} є більшим при низхідному фрезеруванні і меншим при висхідному за решти однакових умов. Для коливань у напрямку руху подачі матриця динамічних коефіцієнтів a_{yy} визначається [7–10] у межах кута контакту $\phi_{cont} = [\phi_{st}; \phi_{ex}]$:

$$a_{yy} = \frac{1}{2} [\cos 2\phi - 2K_r\phi + K_r \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, \quad (3)$$

де K_r – безрозмірний радіальний коефіцієнт сили різання, що описує співвідношення між радіальною та тангенціальною складовими силами різання.

Граничне значення глибини різання t_{lim} , за якого процес залишається динамічно стабільним, визначається таким чином [7–10]:

$$t_{lim} = \frac{2\pi}{z a_{yy} K_t \Re[G_{yy}(j\omega_c)]}, \quad (4)$$

де z – кількість зубців фрези; K_t – питома тангенціальна складова сили різання (Н/мм²); $\Re[G_{yy}(j\omega_c)]$ – дійсна частина передавальної функції $G_{yy}(j\omega_c)$, що фактично характеризує динамічну піддатливість системи.

Можна зробити припущення, що меншим кутам нахилу поверхні відповідають більші значення питомої тангенціальної складової сили різання. В той самий час, меншим кутам нахилу поверхні відповідають менші значення радіального коефіцієнта сили різання, оскільки більша частина сили різання спрямовується вздовж осі фрези. Також при низхідній стратегії (рис. 3, б) осьова складова сили різання є більшою, ніж при висхідній (рис. 3, а).

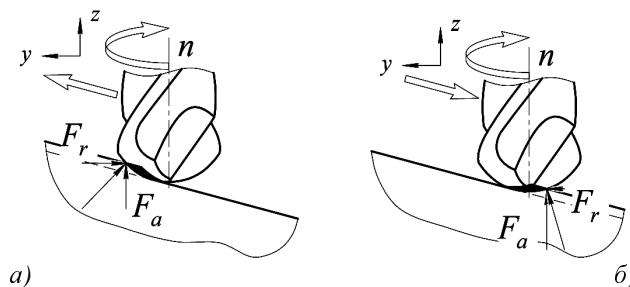


Рис. 3. Осьова та радіальна складові сили різання при висхідній (а) та низхідній (б) стратегіях

Для підтвердження чи спростування зроблених припущень проведено експериментальні дослідження для попутного фрезерування заготовок з різними кутами нахилу за низхідною та висхідною стратегіями обробки.

Опис експериментальної установки. Схема експериментальної установки для дослідження впливу кута нахилу поверхні заготовки на динамічну сталість процесу різання під час обробки похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами зображена в масштабі на рисунку 4. Підкладка (5) є значно піддатливою в напрямку осі y за рахунок просвердлених у ній поздовжніх отворів, порівняно з іншими напрямками. Як зазначалося раніше, її динамічні властивості характеризуються жорсткістю k_{yy} та демпфуванням ζ_{yy} . Дана підкладка затискається в губках лещат (6), а до неї кріпиться заготовка (3) з оброблюваною поверхнею, нахиленою під кутом ϕ_a . Вісь фрези (1), затиснутої в цанговий патрон (2), паралельна осі z . Виконуючи різання по низхідній або по висхідній траєкторіях, фреза змушує коливатися підкладку з заготовкою в напрямку осі y . Дані коливання фіксуються акселерометричним датчиком (4), яким є п'єзоелектричний перетворювач ДН-4-М1 (робочий діапазон до 12,6 кГц), закріплений шпилькою до поверхні підкладки. Дані з датчика проходять через АЦП моделі Е14-440 фірми L-Card та потрапляють до ноутбука, де зберігаються в базі даних. Обробка даних здійснюється в програмі LGraph 2.

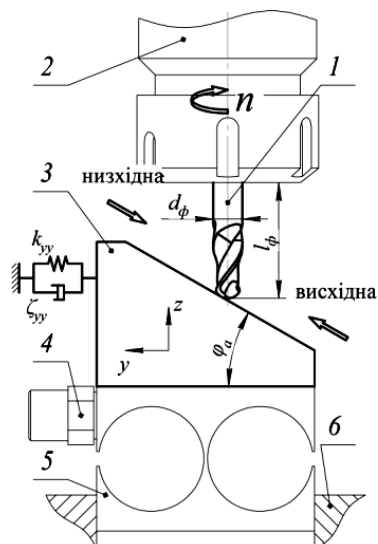


Рис. 4. Схема експериментальної установки: 1 – твердосплавна монолітна двозуба сферична кінцева фреза $\varnothing 8$; 2 – цанговий патрон ВТ40; 3 – заготовка з оброблюваною поверхнею, нахиленою під кутом φ_a ; 4 – перетворювач п'єзоелектричний вібровимірювальний моделі ДН-4-М1; 5 – підкладка, піддатлива в напрямку осі y ; 6 – губки лецят

Попередньо визначається частота власних коливань f_n підкладки з заготовкою за допомогою пристрою нанесення тестових ударів, що являє собою молоток із зафіксованим на ньому датчиком, як описано в [6]. Важливо зазначити, що заготовки необхідно виготовити такими, щоб вони мали приблизно однакову масу. Після визначення частоти власних коливань найбільш піддатливої моди до торцевих поверхонь підкладки пригвинчуються дві пластини, що роблять підкладку жорсткою. На оброблюваній поверхні деталі виконуються попередні пазові проходи з відомими координатами по осі x з різними значеннями радіальної глибини різання t_r . Така підготовка є необхідною для проведення досліджень при попутному чи зустрічному різанні. Перед початком тестів обидві пластини відгвинчуються від торцевих поверхонь підкладки, система знову стає нежорсткою в напрямку осі y . При проведенні тестів з різними заготовками змінюються кут нахилу поверхні φ_a , швидкість обертання фрези n , радіальна глибина різання t_r . Діаметр фрези d_ϕ , її виліт l_ϕ та значення подачі на зуб s_z є однаковим для всіх тестів. Для чистоти проведення дослідів проводився постійний візуальний контроль зношування різальних кромek фрези, за необхідності фреза замінювалася на аналогічну.

Аналіз отриманих результатів. Було проведено низку тестів, під час яких оброблялися сталеві заготовки марки сталь 20 (ГОСТ 1050-88) з різними кутами нахилу оброблюваної поверхні (від $7^\circ 30'$ до $52^\circ 30'$ з кроком $7^\circ 30'$). Радіальна глибина різання змінювалася в діапазоні від 0,10 до 0,50 мм. Швидкість обертання шпинделя змінювалася в діапазоні від 5850 до 8000 об./хв. Обробка виконувалася як по висхідній траєкторії, так і по низхідній за попутною схемою різання. Все це дало можливість дослідити процес різання в діапазоні швидкостей від 9 до 200 м/хв.

Дослідження проводилися на триосьовому фрезерному верстаті з ЧПК моделі Victor VC-85. Діаметр фрези $d_\phi = 8$ мм, її виліт $l_\phi = 32$ мм, подача на зуб $s_z = 0,10$ мм/зуб. Ширина фрезерування для всіх досліджень визначалася так:

$$a_e = \sqrt{r_\phi^2 - (r_\phi - t_r)^2} . \quad (5)$$

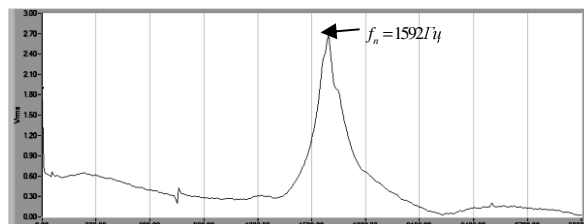
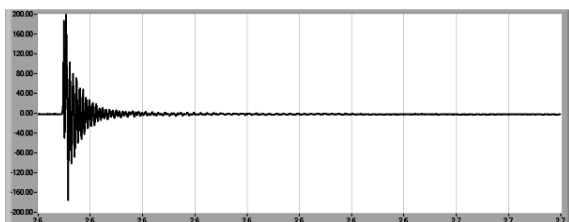


Рис. 5. Визначення частоти власних коливань системи з одним ступенем вільності

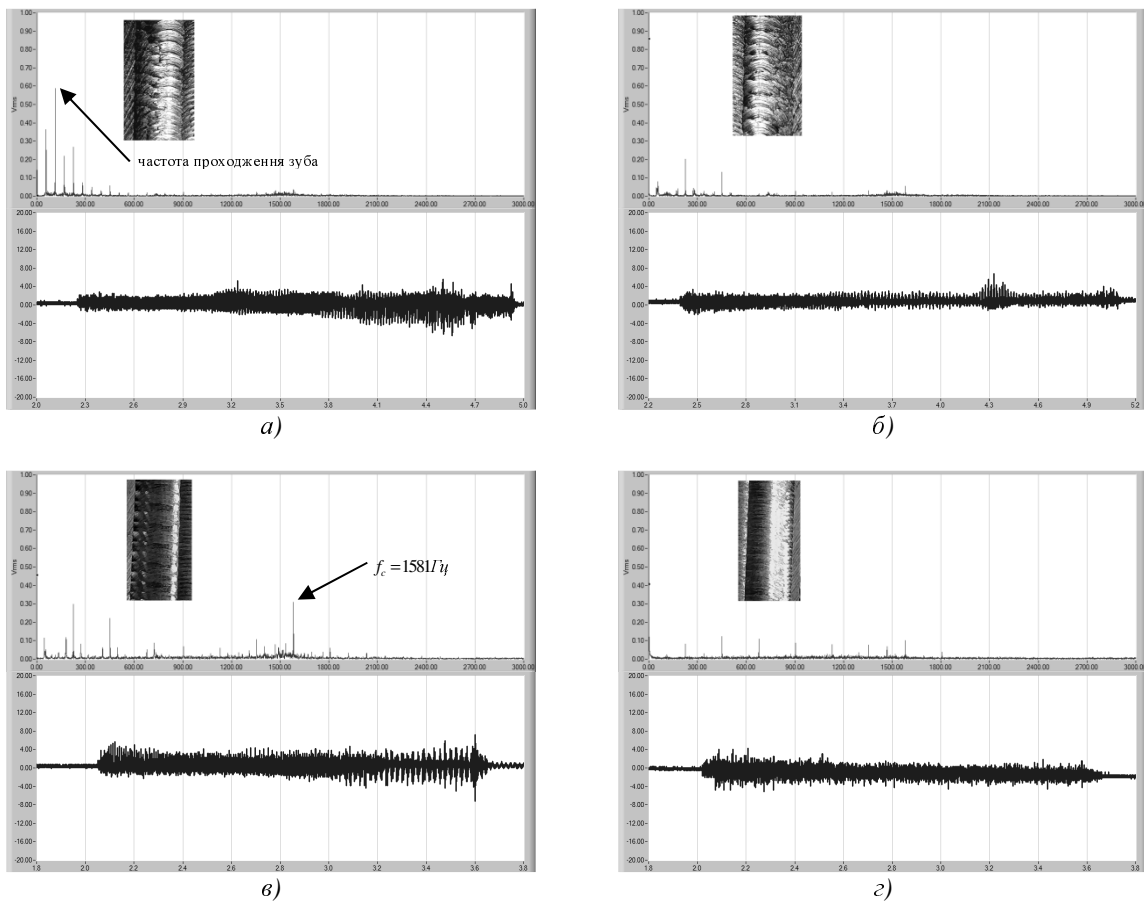
Визначена частота власних коливань (рис. 5) складала $f_n = 1592$ Гц. Коефіцієнт демпфування $\zeta_{yy} = 0,045$.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що динамічна сталість низхідної обробки втрачається за менших значень радіальної глибини різання, ніж динамічна сталість висхідної обробки. Так, наприклад, при обробці поверхні, нахиленої під кутом $\varphi_a = 37^\circ 30'$, з радіальною глибиною різання 0,50 мм за низхідною стратегією (рис. 6, д) домінують зростаючі коливання з частотою, близькою до частоти власних коливань ($f_c = 1548$ Гц). У той самий час, при обробці за висхідною стратегією за тих самих умов коливання з частотою, близькою до частоти власних коливань, не є яскраво вираженими.

Інший цікавий, з нашої точки зору, ефект проявляється в тому, що при значному збільшенні радіальної глибини різання (від 0,10 до 0,50 мм) амплітуда коливань майже не зростає. Яскравіше це проявляється при висхідній обробці, а в деяких випадках амплітуда коливань навіть зменшувалась.

На нашу думку, такі ефекти обумовлюються меншими значеннями ефективного радіуса фрези, оскільки при цьому має місце в рази менша швидкість різання і, як наслідок, виникають більші сили різання.

Фрезерування поверхонь з меншими значеннями кута нахилу оброблюваної поверхні є динамічно сталим за більших значень глибини обробки. Але експериментальні дослідження показали, що за малих значень глибини різання при кутах нахилу оброблюваної поверхні $7^\circ 30'$ та 15° виникають коливання на низьких частотах, близьких до частоти проходження зуба фрези. Такі коливання суттєво негативно впливають на якість обробленої поверхні, що видно на рисунках 6, а та б.



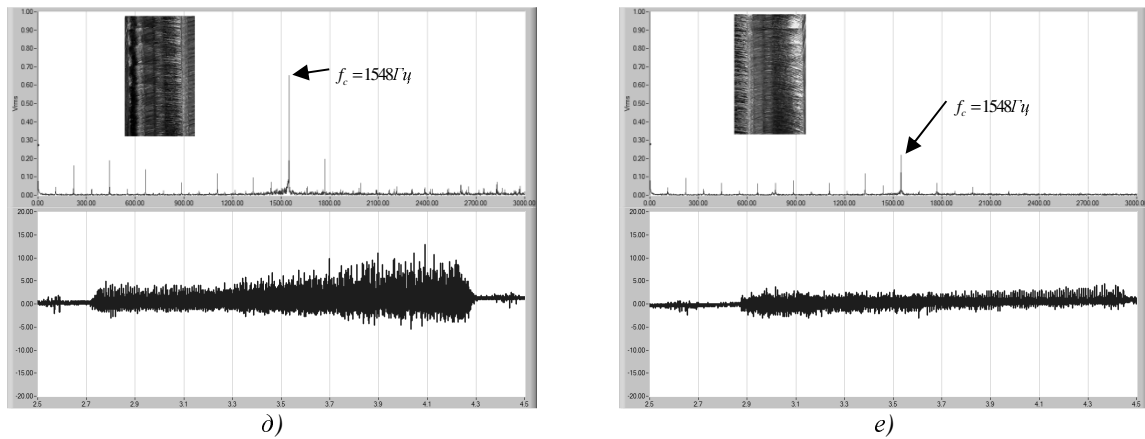


Рис. 6. Сигнали, їхні спектри та мікрофотознімки поверхонь при обробці різних заготовок з різними параметрами обробки: а) низхідна стратегія; $\varphi_a = 7^\circ 30'$; $n = 6776$ об./хв.; $t_r = 0,20$ мм; б) висхідна стратегія; $\varphi_a = 7^\circ 30'$; $n = 6776$ об./хв.; $t_r = 0,20$ мм; в) низхідна стратегія; $\varphi_a = 22^\circ 30'$; $n = 6776$ об./хв.; $t_r = 0,20$ мм; г) висхідна стратегія; $\varphi_a = 22^\circ 30'$; $n = 6776$ об./хв.; $t_r = 0,20$ мм; д) низхідна стратегія; $\varphi_a = 37^\circ 30'$; $n = 6636$ об./хв.; $t_r = 0,50$ мм; е) висхідна стратегія; $\varphi_a = 37^\circ 30'$; $n = 6636$ об./хв.; $t_r = 0,50$ мм

Подальші дослідження. У межах даної роботи не ставилося завдання побудови діаграм динамічної сталості, що може бути зроблено в подальшому. Цікавим розвитком роботи може бути, зокрема, побудова тривимірних діаграм динамічної сталості, де, окрім класичних глибини різання та швидкості обертання шпинделя, можуть бути зазначені вплив кута нахилу поверхні та динамічна жорсткість системи. Подібні роботи сьогодні вже проводяться та є актуальними.

Також є певний сенс розширити роботу для коливальної системи з двома ступенями вільності. Аналітичний розрахунок поведінки такої системи є доволі складним і вимагає проведення досліджень для декількох мод коливань.

Розуміння впливу активної складової демпфування на виникнення та розвиток вібрацій при різанні є особливо актуальним, оскільки це дозволить більшою мірою наблизити теоретичну модель коливальної системи до реальної технологічної системи. Вирішення цього завдання потребує використання інструментарію нелінійної динаміки. Роботи в цьому напрямку сьогодні активно ведуться як в Україні, так і за кордоном.

Це стосується також і фрезерування сферичними кінцевими фрезами при високошвидкісній обробці. В цьому випадку при малих припусках на контакт зуба фрези та заготовки припадає мала частина циклу оберту фрези, що може призвести до нелінійних коливань системи.

Висновки. У даній роботі було досліджено вплив кута нахилу поверхні заготовки на динамічну сталість процесу різання під час обробки похилих поверхонь сферичними фрезами при попутному різанні за висхідною та за низхідною стратегіями.

Проведені експерименти для попутної обробки нахилених під різними кутами (від $7^\circ 30'$ до $52^\circ 30'$ з кроком $7^\circ 30'$) поверхонь за висхідною та низхідною стратегіями дали можливість прийти до таких висновків.

1. За менших значень кута нахилу (до 15°) виникають значні коливання на частоті проходження зуба фрези.

2. При збільшенні радіальної глибини різання в декілька разів амплітуда коливань майже не зростає, а в деяких випадках навіть зменшується. Яскравіше цей ефект проявляється при висхідній обробці. Причиною цього є, вочевидь, те, що меншим значенням припуску відповідають менші значення ефективного радіуса фрези. При цьому має місце в рази менша швидкість різання і, як наслідок, виникають більші сили різання.

3. З тих самих причин низхідне фрезерування є менш сталим за всіх значень кута нахилу поверхні заготовки.

Список використаної літератури:

1. Юмашев В.С. Аналіз вібрацій при різанні радіусними кінцевими фрезами із застосуванням теорії діаграм сталості / В.С. Юмашев О.О. Штегін // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2014. – № 1 (68). – С. 21–30.

2. Штегін О.О. Визначення кутів врізання та виходу при обробці похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами / О.О. Штегін // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2014. – № 3 (70). – С. 62–67.
3. Штегін О.О. Метод побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Ч. 1. Вихідні дані / О.О. Штегін // Журнал інженерних наук. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. А25–А31.
4. Штегін О.О. Метод побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Ч. 2. Побудова діаграм / О.О. Штегін // Журнал інженерних наук. – в друці.
5. Vopat T. The Tool Life of Ball Nose end Mill Depending on the Different Types of Ramping / T.Vopat, J.Peterka, M.Kovac // Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology. – 2014. – Т. 22, № 341. – С. 115–121.
6. Tong J.H. Fabrication of a piezoelectric impact hammer and its application to the in-situ nondestructive evaluation of concrete / J.H. Tong, T.T. Wu, C.K. Lee // Japanese journal of applied physics. – 2002. – Т. 41, № 11R. – С. 65–95.
7. Altintas Y. Analytical prediction of stability lobes in milling / Y.Altintas, E.Budak // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 1995. – 44 (1). – Pp. 357–362.
8. Budak E. Analytical prediction of chatter stability in milling. P. I : general formulation / E.Budak, Y.Altintas // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1998. – 120(1). – Pp. 22–30.
9. 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. – 120(1). – Pp. 31–36.
10. Analytical prediction of stability lobes in ball end milling / Y.Altintas, E.Shamoto, P.Lee et al. // Journal of manufacturing science and engineering. – 1999. – 121(4). – Pp. 586–592.

ШТЕГІН Олексій Олександрович – асистент кафедри технологій машинобудування Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- верстати з ЧПК;
- вібрації в металообробці.

ЮМАШЕВ Володимир Євгенович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- процес фрезерування на верстатах з ЧПК;
- вібрації при різанні сферичними кінцевими фрезами.

Стаття надійшла до редакції 05.06.2015