

УДК 621.914.22

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ФОРМУВАННЯ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

Дядя С. І.	канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: djadja@zpu.edu.ua;
Козлова О. Б.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kozlova@zpu.edu.ua;
Кушнір Є. В.	студент Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: evgen.kushnir99@gmail.com;
Карамушка Д. Р.	студентка Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ushudah@gmail.com

Мета роботи. Дослідження коливань, які виникають при кінцевому фрезеруванні та їх вплив на формування обробленої поверхні.

Методи дослідження. Дослідження проводили експериментальним методом, при якому записували осцилограми коливань деталі з виділенням часу різання при фрезеруванні. Аналітичним методом досліджували базові фрагменти осцилограм, на яких виміряли параметри, що характеризують процес фрезерування, і визначали їх зв'язок з обробленою поверхнею.

Отриманні результати. При фрезеруванні з низькими частотами обертання шпинделя, при попутному та зустрічному напрямку подачі, на деталь діють різні види коливань, які характерні для першій та другій швидкісній зоні коливань. При зустрічному та попутному кінцевому фрезеруванні у першій швидкісній зоні коливань діють тільки вимушені коливання. У другій швидкісній зоні при зустрічному фрезеруванні на вимушені коливання накладаються супроводжуючі власні коливання технологічної системи. Експериментально-аналітично доведено, що виникаюче при цьому відхилення від положення пружної рівноваги першої хвилі супроводжуючих коливань впливає на крок та висоту хвилястості обробленої поверхні, що підтверджує зв'язок між динамікою кінцевого фрезерування і формоутворенням.

Наукова новизна. Оцінка впливу супроводжуючих вільних коливань технологічної системи при різанні на формування обробленої поверхні здійснюється за допомогою параметрів, що характеризують динаміку кінцевого фрезерування.

Практична цінність. Отримані результати доводять вплив швидкості різання на амплітуду супроводжуючих вільних коливань технологічної системи і надають можливість обирати режими різання, що забезпечують вібросталість фрезерування.

Ключові слова: фрезерування, профілограма, осцилограма, хвилястість, крок, висота.

Вступ

Ще на початку ХХ століття Таулер у своїй праці «Мистецтво різання металів» [1] відмічав негативний вплив вібрацій при різанні металів на якість обробленої поверхні. З того часу було проведено багато досліджень щодо видів коливань при механічній обробці, причин їх виникнення та методів зменшення інтенсивності або усунення [6–8 та інш.].

При кінцевому фрезеруванні принциповим є відсутність автоколивань і наявність супроводжуючих вільних коливань технологічної системи [2]. Залежність супроводжуючих вільних коливань від початкових умов [3] показує, що зі збільшенням швидкості різання збільшується їх інтенсивність, яка впливає на стійкість інструменту, якість обробленої поверхні. Найбільш це проявляється при амплітуді коливань більше 0,02 мм

[4]. Тому швидкості різання поділені на зони в залежності від інтенсивності супроводжуючих вільних коливань технологічної системи. За критерій розподілу вибрано визначальне співвідношення (BC), яке залежить від часу різання та періоду власних коливань деталі ($BC = (t_{piz}/ТВК)$) [5]. Найбільш несприятливою є третя швидкісна зона коливань, в якій при кінцевому фрезеруванні утворюється хвиляста оброблена поверхня. Також інтенсивність коливань в цій зоні перевищує 0,02 мм. Вона охоплює режими різання, на яких виконуються чорнові та напівчистові операції при фрезеруванні деталей з важкооброблюваних матеріалів. Саме тому в більшості робіт досліджуються коливання в цій зоні [5]. Оброблені поверхні після кінцевого фрезерування в першій і другій швидкісних зонах є більш якісними і тому менш дослідженими. Проте без

знання розвитку коливань в них і механізму формування обробленої поверхні неможливо відслідкувати еволюцію зміни супроводжуваних власних коливань технологічної системи зі збільшенням швидкості різання.

Тому метою роботи є дослідження коливань, що виникають при кінцевому фрезеруванні в тих швидкісних зонах, де їх інтенсивність не перевищує 0,02 мм та визначення механізму утворення обробленої поверхні при цьому.

Аналіз літературних джерел

Довгий час вважалося, що вібрації при різанні є вимушеними коливаннями [9]. Але у 1937 році Дроздов у своїй роботі [10] показав, що частота коливань не змінюється в широкому діапазоні швидкостей різання. На цій підставі він дійшов висновку, що коливання при різанні слід вважати автоколиваннями.

Автоколивання поділяють на первинні, що збуджуються при першому проході інструменту, та вторинні, що виникають при різанні хвилястим слідом.

Первинні автоколивання виникають від причин, що розглянуті в роботах [11–13 та інш.]. Крім того при фрезеруванні виділяють такі причини, як періодичні імпульсні навантаження в технологічній системі (ТС) при вході та виході зубів фрези із заготовки та зміна сили різання за величиною в межах довжини контакту зуба фрези із заготовкою через непостійну товщину шару, що зрізається [14]. Також при кінцевому фрезеруванні тонких зрізів в зоні різання завжди знаходиться один зуб і, як відмічається в дослідженні [15], часу різання недостатньо для того, щоб встановилися незатухаючі автоколивання. Тому, як вважає Пановко Я. Г. [16], за таких умов діють супроводжуючі вільні коливання технологічної системи, які накладаються на вимушені коливання.

Для дослідження коливань при кінцевому фрезеруванні використовують базові фрагменти осцилограм, за якими визначають характеристики процесу різання [5].

У зв'язку з тим, що інтенсивність коливань при різанні збільшується зі збільшенням швидкості різання, виконано розподіл на швидкісні зони коливань [5]. Статистична обробка результатів досліджень показала, що при величині визначального більше 25 (перша швидкісна зона) – діють тільки вимушені коливання. Коли це співвідношення знаходиться в межах між 25 та 7 (друга швидкісна зона) – на вимушені коливання накладаються супроводжуючі вільні коливання технологічної системи, інтенсивність яких не перевищує 0,02 мм. Як відзначається в роботі [4], така величина є сприятливою для стружкоутворення і не впливає на стійкість інструменту. В третій швидкісній зоні, коли ВС знаходиться в межах від 7 до 1, інтенсивність коливань при різанні перевищує 0,02 мм, що є несприятливим, як для точності обробленої поверхні, так і для стійкості інструменту. В четвертій та п'ятій швидкісних зонах час різання менший за період супроводжуваних вільних коливань, тому в них діють тільки

вимушені коливання. В роботах [17, 18 та інш.] розглядаються методики зменшення інтенсивності коливань в третій – п'ятій зонах, що підвищує якість обробленої поверхні.

Незважаючи на те, що у першій швидкісній зоні супроводжуючі вільні коливання відсутні, а у другій мають незначну інтенсивність, практично відсутні дослідження механізму утворення обробленої поверхні в цих зонах.

Матеріал і методика дослідження

Експериментальні дослідження проводились на стенді, конструкція якого дозволяє моделювати обробку деталей з різними динамічними характеристиками та з різних матеріалів [5].

Для аналізу процесу кінцевого фрезерування використовували базові фрагменти осцилограм (БФО) [5].

При дослідженнях з'ясувалося, які з параметрів, що характеризують процес кінцевого фрезерування, діють у першій і другій швидкісних зонах коливань та їх зв'язок з формоутворенням обробленої поверхні.

Експерименти проводилися за наступних умов:

1. Інструмент – кінцева фреза з механічним кріпленням різальних пластин, $\varnothing 16$ мм, $z = 1$, BK8.
2. Матеріал зразка – Ст. 3 ГОСТ 380-2005.
3. Частота обертання шпинделя – $n = 120$ об/хв, $n = 300$ об/хв.
4. Подача на зуб – $S_z = 0,1$ мм.
5. Радіальна глибина різання – $a_e = 0,5$ мм.
6. Осьова глибина різання – $a_p = 4$ мм.
7. Виліт тонкостінної пластини – $H = 80$ мм. Товщина пластини – $a = 6$ мм. Довжина пластини – $b = 50$ мм.
8. Частота власних коливань тонкостінної пластини $f_{вк} = 590$ Гц.
9. Напрямок подачі – попутний та зустрічний.

Результати дослідження та їх обговорення

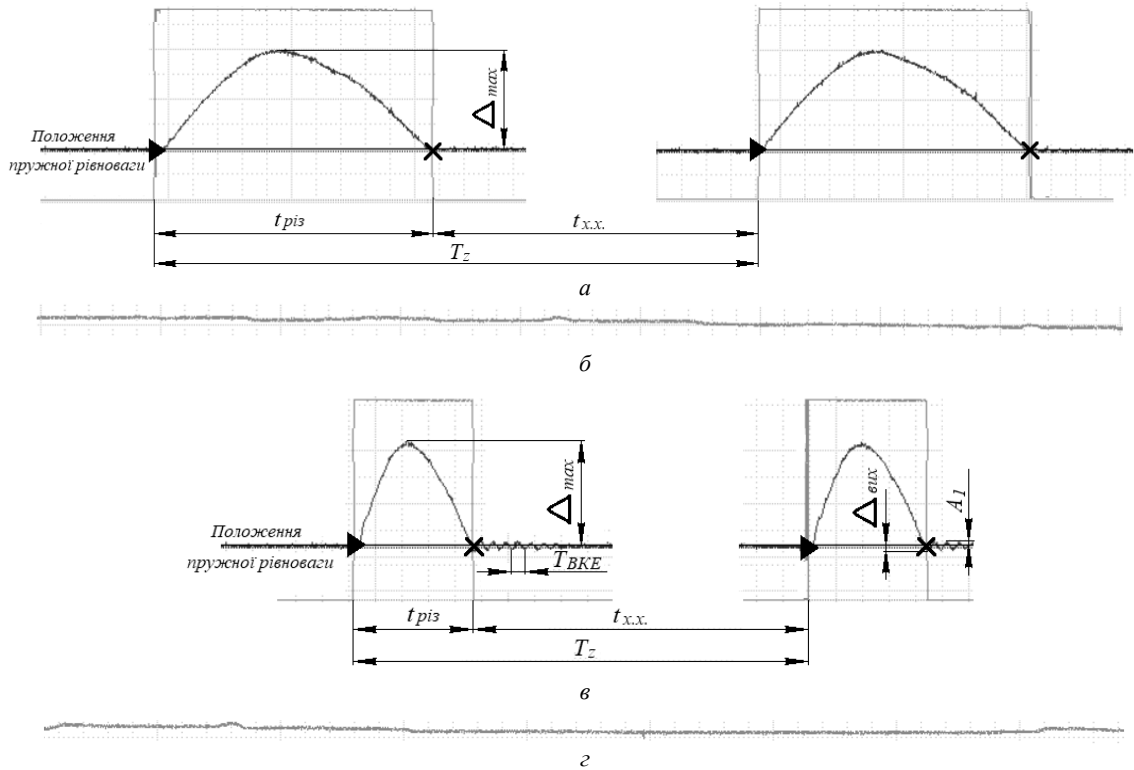
На рис. 1 показані БФО та профілограми оброблених поверхонь при попутному кінцевому фрезеруванні з різними частотами обертання шпинделя.

Аналіз БФО показує, що при попутному кінцевому фрезеруванні однозубою фрезою з частотою обертання шпинделя $n = 120$ об/хв деталь перед врізанням інструменту в деталь знаходиться в положенні пружної рівноваги і з параметрів, що характеризують процес різання, можна оцінити тільки час різання – тріз, час холодого ходу – $t_{х.х.}$, період зубцевої частоти – T_z та максимальні відхилення деталі від дії змушуючої сили – Δ_{max} . Після виходу фрези з зони різання деталь без коливань повертається в положення рівноваги (рис. 1а).

При фрезеруванні з частотою обертання шпинделя $n = 300$ об/хв фреза також врізається в деталь, що знаходиться в положенні рівноваги. При різанні діють вимушені коливання, що відхиляють деталь на величину – Δ_{max} . Після виходу інструменту з зони різання

деталь здійснює вільні затухаючі коливання з періодом – ТВКЕ, які згасають до наступного врізання в деталь. При цьому можна оцінити такі додаткові параметри, як амплітуда власних коливань при виході інструмента з

деталі – A_1 та відхилення від пружної рівноваги точки виходу фрези з зони різання – $\Delta_{вих.}$ (рис. 1б).



► - точка врізання фрези в деталь; х – точка виходу інструмента з деталі
Рис. 1. БФО (а, в) та профілограми обробленої поверхні (б, г) при попутному кінцевому фрезеруванні з частотами обертання шпинделя: $n = 120$ об/хв (а), $n = 300$ об/хв (б)

Наведені профілограми показують, що оброблені поверхні мають похибку форми у вигляді відхилення від прямолінійності, але хвилястість на них відсутня.

На рис. 2–5 показані графіки змін часу різання – $t_{різ}$, часу холостого ходу – $t_{х.х.}$, періоду зубцевої частоти – T_z та максимального відхилення деталі – Δ_{max} при попутному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя $n = 120$ об/хв.

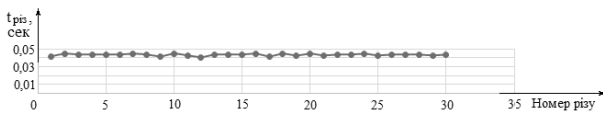


Рис. 2. Графік зміни часу різання

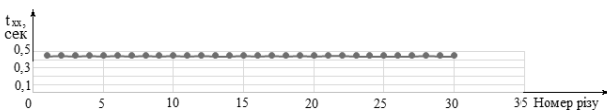


Рис. 3. Графік зміни холостого ходу

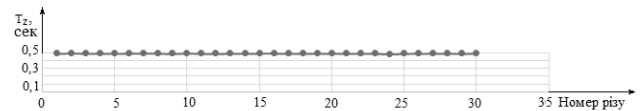


Рис. 4. Графік зміни зубцевої частоти

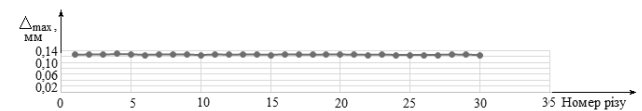


Рис. 5. Графік зміни максимального відхилення деталі

Графіки показують, що параметри, які характеризують процес різання при частоті обертання шпинделя $n = 120$ об/хв, практично не змінюються. Це говорить про те, що властивості технологічної системи «інструмент – деталь» при попутному кінцевому фрезеруванні в першій швидкісній зоні коливань є стійкими щодо дії сили різання. Цьому також сприяє і особливість попутного фрезерування, яке починається з найбільшої товщини шару, що зрізається і підвищує демпфуючі властивості технологічної системи.

На рис. 6–11 наведені графіки змін часу різання – $t_{\text{різ}}$, часу холостого ходу – $t_{\text{х.х.}}$, періоду зубцевої частоти – T_z , максимального відхилення деталі – Δ_{max} , відхилення від пружної рівноваги точки виходу фрези з зони різання – $\Delta_{\text{вих}}$, амплітуди власних коливань деталі на виході інструменту – A_1 при попутному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя $n = 300$ об/хв.

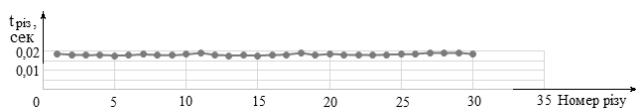


Рис. 6. Графік зміни часу різання

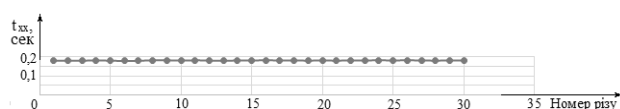


Рис. 7. Графік зміни часу холостого ходу

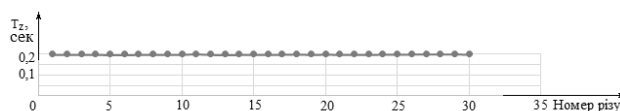


Рис. 8. Графік зміни періоду зубцевої частоти

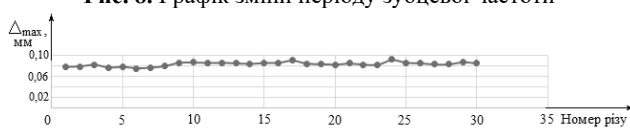


Рис. 9. Графік зміни максимального відхилення деталі

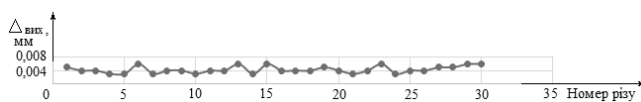


Рис. 10. Графік зміни відхилення деталі від положення пружної рівноваги на виході інструменту

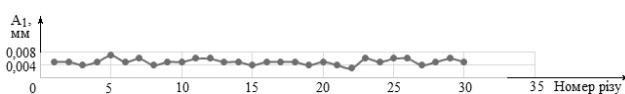


Рис. 11. Графік зміни амплітуди власних коливань деталі на виході інструменту

Наведені графіки зміни параметрів, що характеризують процес різання при попутному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя $n = 300$ об/хв, показують, що всі вони практично не змінюються. Виникаючі вільні згасаючі коливання деталі після виходу фрези з зони різання мають незначну амплітуду (до $A_1 = 0,008$ мм). Логарифмічний декремент затухання коливань дорівнює $\lambda = 0,148$.

Час різання при $n = 300$ об/хв є меншим, ніж при фрезеруванні з частотою $n = 120$ об/хв. При цьому довжини поверхонь різання однакові.

Оброблена поверхня після кінцевого фрезерування формується з ділянок поверхні різання, які залишаються після руху подачі. Виходячи з того, що довжина поверхні різання прямо пропорційна часу різання, який при фрезеруванні не змінюється, як у першій, так і у другій швидкісних зонах коливань, то і довжини поверхонь різання в кожній зоні коливань мають однакові розміри. Тому кожен різ фрези послідовно залишає ділянки у вигляді западин, які після закінчення різання формують оброблену поверхню. На підставі того, що і час різання і максимальні відхилення деталі при розглянутих частотах обертання шпинделя не змінюються, то і западини, які залишаються, знаходяться на однаковій відстані від положення пружної рівноваги. Це пояснює, чому після попутного кінцевого фрезерування у першій і другій швидкісних зонах коливань отримана поверхня без хвилястості.

На рис. 12 показані БФО та профілограми обробленої поверхні, що отримані при зустрічному кінцевому фрезеруванні з різними частотами обертання шпинделя.

При зустрічному кінцевому фрезеруванні у першій швидкісній зоні коливань діють тільки вимушені коливання, що відхиляють деталь на величину – Δ_{max} . Фреза врізається у деталь, що знаходиться у положенні пружної рівноваги. Після виходу інструменту з зони різання деталь повертається до цього положення (рис. 12а).

При зустрічному кінцевому фрезеруванні у другій швидкісній зоні через те, що різання починається з найменшої товщини шару, який зрізається, після врізання інструменту в деталь на вимушені коливання накладаються супроводжуючі власні коливання технологічної системи з періодом ТСК, які затухають до закінчення різання. Холостий хід починається з вільних коливань деталі з частотою ТВКЕ, які затухають до наступного врізання фрези в деталь (рис. 12б).

Поверхня після фрезерування з частотою обертання шпинделя $n = 120$ об/хв має рівний профіль, але спостерігаються відхилення від прямолінійності. Хвилястість на ній відсутня. На обробленій поверхні після зустрічного кінцевого фрезерування з частотою обертання шпинделя $n = 300$ об/хв у другій швидкісній зоні є хвилястість з кроком $S_w = 0,4$ мм та висотою $W_z = 0,01$ мм.

На рис. 13–16 показані графіки змін часу різання – $t_{\text{різ}}$, часу холостого ходу – $t_{\text{х.х.}}$, періоду зубцевої частоти – T_z та максимального відхилення деталі – Δ_{max} при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя $n = 120$ об/хв.

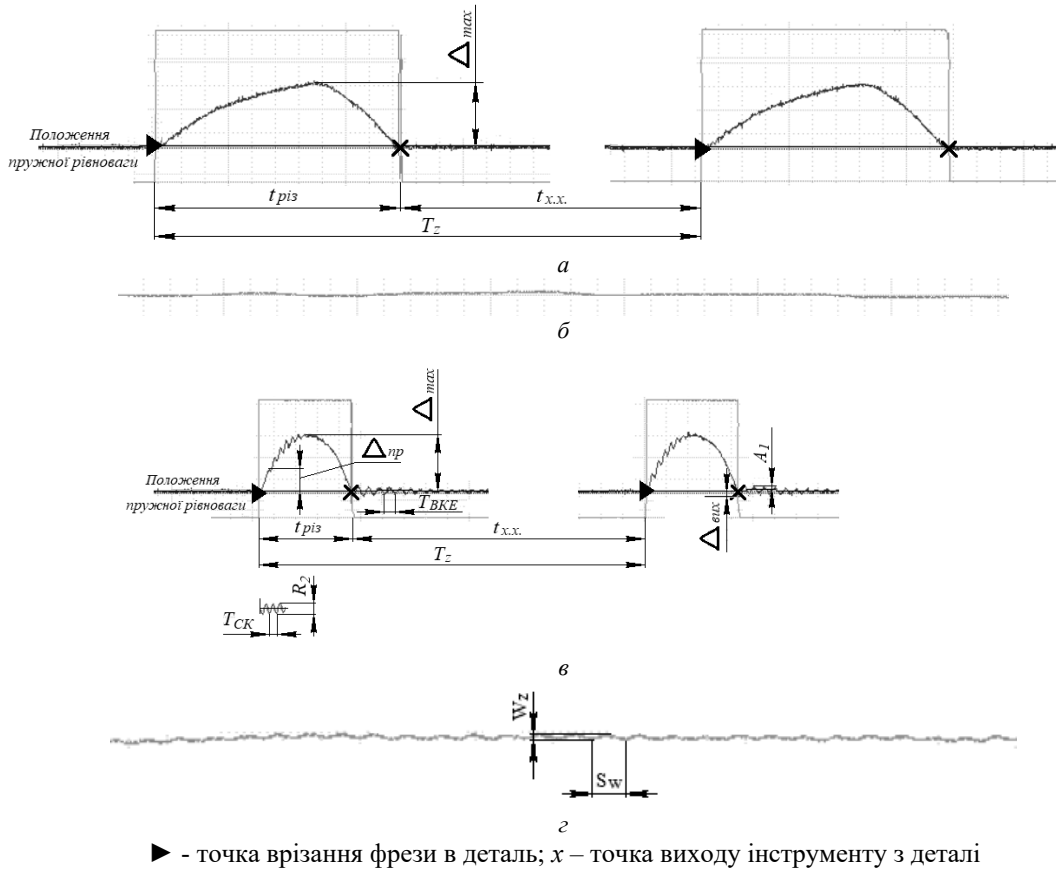


Рис. 12. БФО (а, в) та профілограми обробленої поверхні (б, г) при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотами обертання шпинделя: $n = 120$ об/хв (а, б), $n = 300$ об/хв (в, г)

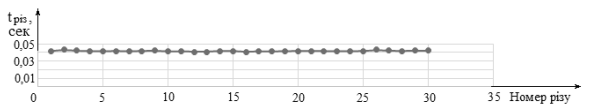


Рис. 13. Графік зміни часу різання

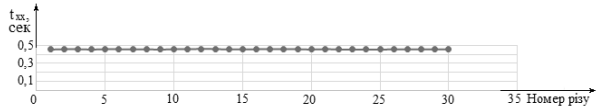


Рис. 14. Графік зміни часу холостого ходу

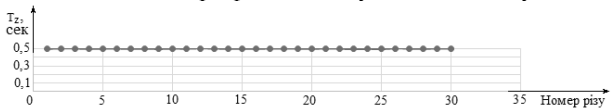


Рис. 15. Графік зміни періоду зубцевої частоти

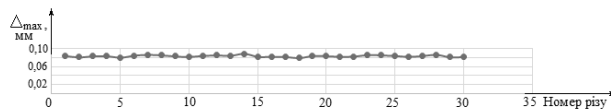


Рис. 16. Графік зміни максимального відхилення деталі

Графіки показують, що параметри, які характеризують процес зустрічного фрезерування при частоті обертання шпинделя $n = 120$ об/хв, практично не змінюються. Це говорить про те, що властивості технологічної системи «інструмент – деталь» при зустрічному кінцевому фрезеруванні в першій швидкісній зоні коливань, як і при попутному, є стійкими щодо дії сили різання.

На рис. 17–23 наведені графіки змін часу різання – $t_{різ}$, часу холостого ходу – $t_{х.х.}$, періоду зубцевої частоти – T_z , максимального відхилення деталі – Δ_{max} , відхилення від положення пружної рівноваги деталі на виході інструмента – $\Delta_{вих}$, амплітуди власних коливань деталі при виході інструмента – A_1 , відхилення від положення пружної рівноваги першої хвилі супроводжуваних вільних коливань – $\Delta_{пр}$ при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя $n = 300$ об/хв.

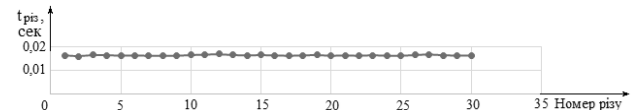


Рис. 17. Графік зміни часу різання

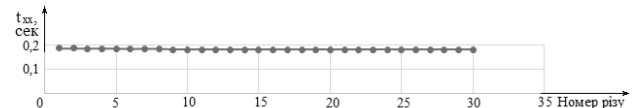


Рис. 18. Графік зміни часу холостого ходу

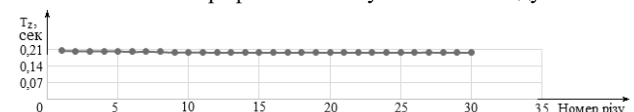


Рис. 19. Графік зміни періоду зубцевої частоти

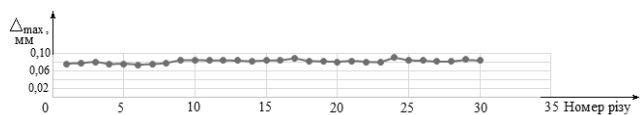


Рис. 20. Графік зміни максимального відхилення деталі

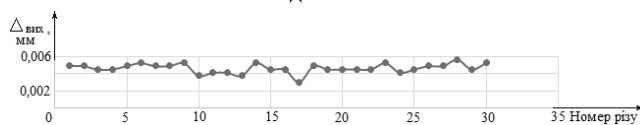


Рис. 21. Графік зміни відхилення деталі від положення пружної рівноваги на виході інструменту

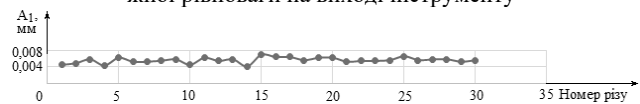


Рис. 22. Графік зміни амплітуди власних коливань деталі на виході інструменту

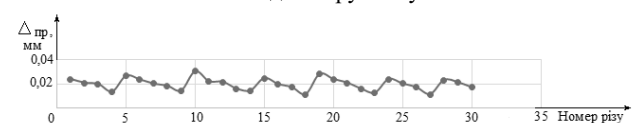


Рис. 23. Графік зміни відхилення від положення пружної рівноваги першої хвилі супроводжуваних вільних коливань технологічної системи

Наведені графіки змін параметрів процесу різання при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя $n = 300$ об/хв показують, що практично не змінюються час різання, час холостого ходу, максимальне відхилення деталі. Відхилення деталі від положення рівноваги при виході інструменту з зони різання має незначний розкид в межах $\Delta_{вих} = 0,003$ мм. Амплітуда вільних коливань деталі після виходу фрези має величину до $A_1 = 0,007$ мм. Тому при логарифмічному декременті затухання коливань, що дорівнює $\lambda = 0,207$, вона зникає ще до початку нового різання.

Порівняння форми графіку зміни відхилення від положення пружної рівноваги першої хвилі супроводжуваних вільних коливань технологічної системи та профілю обробленої поверхні на профілограмі показує їх ідентичність, як за кроком так і за висотою хвилястості. Крім цього на спільність вказують і результати розрахунків. Різниця між найбільшим та найменшим значенням $\Delta_{пр} = 0,0239 - 0,0135 = 0,0104$ мм. Періодичність змін значень $\Delta_{пр}$ дорівнює 4...5 різам фрези (рис. 23). При подачі на зуб 0,1 мм крок періодичності буде 0,4...0,5 мм. Аналогічні значення мають висота та крок хвилястості на обробленій поверхні (рис. 12z)

Записані на осцилограмі коливання при різанні відображують профіль поверхні різання. Тому похибки з неї, як спадщина, передаються на оброблену поверхню у вигляді хвилястості.

Порівняння записаних осцилограм коливань деталі та профілограм поверхонь після кінцевого фрезерування у першій та другій швидкісних зонах коливань дає підстави казати, що наявність супроводжуваних вільних коливань технологічної системи, які накладаються на вимушені коливання при різанні, є причиною появи хвилястості на оброблених зразках. Коли різання відбувається без супроводжуваних вільних коливань технологічної системи, оброблена поверхня хвилястості не має.

Висновки

1. При попутному кінцевому фрезеруванні у першій та другій швидкісних зонах діють тільки вимушені коливання і оброблена поверхня має похибку форми у вигляді відхилення від прямолінійності, але без хвилястості.

2. При зустрічному кінцевому фрезеруванні у першій швидкісній зоні діють тільки вимушені коливання і оброблена поверхня має відхилення від прямолінійності, але без хвилястості.

3. При зустрічному кінцевому фрезеруванні у другій швидкісній зоні виникають супроводжувачі вільні коливання, які накладаються на вимушені коливання, і оброблена поверхня має хвилястий профіль.

4. Особливості процесів попутного і зустрічного кінцевого фрезерування впливають на їх демпфуючі властивості. Попутне фрезерування починається з найбільшої товщини шару, що зрізається, а зустрічне – з найменшої. Товщина шару, що зрізається, впливає на властивості технологічної системи «інструмент – деталь» при різанні. Тому, попутне фрезерування є більш стійким до виникнення супроводжуваних вільних коливань, ніж зустрічне. Ці особливості впливають і на те, що максимальне відхилення деталі при попутному фрезеруванні більше, ніж при зустрічному.

5. У першій та другій швидкісних зонах при кінцевому фрезеруванні фреза врізається в деталь, яка знаходиться в положенні рівноваги. Виникаючі вільні коливання деталі після закінчення різання у другій швидкісній зоні згасають до початку наступного різання інструменту в деталь.

6. Максимальні відтискання ТЕД при кінцевому фрезеруванні як з частотою обертання шпинделя 120 об/хв, так і при фрезеруванні з частотою 300 об/хв при попутному фрезеруванні мають однакові значення. Однакові максимальні відтискання деталі отримані і при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотами обертання шпинделя 120 об/хв та 300 об/хв. Це підтверджує те, що швидкість різання має малий вплив на силу різання.

7. На формування профілю обробленої поверхні впливають супроводжувачі вільні коливання технологічної системи, які при різанні накладаються на вимушені. Це підтверджують виконані дослідження, які показують, що відхилення від положення пружної рівноваги першої хвилі супроводжуваних коливань має таку ж періодичність зміни величини, як і крок та висота хвилястості на обробленій поверхні.

Список літератури

1. Taylor F. W. On the art of cutting metals / F. W. Taylor. – New York : Published by the American society of mechanical engineers, 1907. – 248 p.

2. Дядя С. І. Вплив видів коливань на формування поверхні при кінцевому фрезеруванні. / С. І. Дядя, О. Б. Козлова, Д. Р. Карамушка, Є. В. Кушнір // Матеріали XII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 26–27 травня 2022 р., м. Чернігів. – С. 61–62.

3. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики. / В. Е. Кузьмичев. – К. : Наукова думка, 1989. – 864 с.
4. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. / И. Г. Жарков. – Л. : Машиностроение, 1987. – 184 с.
5. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей. Монография / Ю. Н. Внуков (ред.), С. И. Дядя, Е. Б. Козлова [та ін.]. – Запорожье : ЗНТУ, 2017. – 208 с.
6. Кучма Л. К. Вибрации при работе на фрезерных станках и методы их гашения / Л. К. Кучма. – М. : СССР, 1959. – 122 с.
7. Свинин В. М. Фрезерование с модулированной скоростью резания / В. М. Свинин ; под ред. А. И. Промтова. – Иркутск : Изд-во Ир: ТТУ, 2007. – 304 с.
8. Cylindrical milling tools: Comparative real case study for process stability / G. Stepan, J. Munoa, T. Insperger and etc. // CIRP Annals – Manufacturing Technology (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.137>.
9. Рыжков Д. И. Вибрации при резании металлов и методы их устранения / Д. И. Рыжков. – М. : Машгиз, 1961. – 172 с.
10. Дроздов Н. А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н. А. Дроздов // Станки и инструмент. – 1937. – № 22. – С. 21–25.
11. Кедров С. С. Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. – М. : Машиностроение, 1978. – 199 с.
12. Тлустый И. Автоколебания в металлорежущих станках / И.Тлустый. – М. : Машиностроение, 1956. – 234 с.
13. Эльясберг М. Е. Автоколебания металлорежущих станков / М. Е. Эльясберг. – П. : Издание ОКБС, 1993. – 180 с.
14. Ильницкий И. И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И. И. Ильницкий. – Москва-Свердловск : Машгиз, 1958. – 145 с.
15. Особенности концевого фрезерования сложно – профильных тонкостенных деталей. / С. Б. Беликов, А. И. Гермашев, В. А. Логоминов та ін. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – 2. – С. 107–113.
16. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. / Я. Г. Пановко – Л. : Машиностроение, 1976. – 320 с.
17. Merdol S. Multi Frequency Solution of Chatter Stability for Low Immersion Milling / S. Merdol, Y. Altintas // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126/3. – 2004. – P. 459–466.
18. Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling – Part I: General Formulation / E. Budak, Y. Altintas // ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control, 1998. – P. 22–30.

Одержано 21.09.2022

RESEARCH OF OSCILLATIONS DURING END-MILLING AND THEIR INFLUENCE ON THE FORMATION OF THE MACHINED SURFACE

Dyadya S.	Ph. D., Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: djadya@zp.edu.ua ;
Kozlova O.	Ph. D., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kozlova@zp.edu.ua ;
Kushnir E.	student, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: evgen.kushnir99@gmail.com ;
Karamushka D.	student, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: ushudah@gmail.com

Purpose. Study of oscillations that occur during end-milling and their influence on the formation of the processed surface.

Research methods. The research was carried out using the experimental method, in which oscillograms of part oscillations were recorded with the allocation of cutting time during milling. Basic fragments of oscillograms were studied using the analytical method, on which the parameters characterizing the milling process were measured, and their relationship with the processed surface was determined.

Results. When milling with low spindle rotation frequencies, with down and up direction of feed, the part is affected by various types of oscillations, which are characteristic of the first and second speed zones of oscillations. During up and down end-milling, only forced oscillations operate in the first high-speed oscillation zone. In the second speed zone during up milling, the accompanying natural vibrations of the technological system are superimposed on the forced oscillations. It has been experimentally and analytically proven that the resulting deviation from the position of elastic equilibrium of the first wave of the accompanying oscillations affects the pitch and height of the waviness of the processed surface, which confirms the connection between the dynamics of end-milling and shaping.

Scientific novelty. The impact of accompanying free oscillations of the technological system during cutting on the formation of the processed surface is evaluated using parameters characterizing the dynamics of end-milling.

Practical value. The obtained results prove the influence of the cutting speed on the amplitude of the accompanying free oscillations of the technological system and provide an opportunity to choose cutting modes that ensure vibration stability of milling.

Key words: milling, profilogram, oscillogram, waviness, step, height.