

- Дядя С. І. канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, *e-mail: djadja@zntu.edu.ua;*
- Козлова О. Б. канд. техн. наук, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, *e-mail: kozlova@zntu.edu.ua;*
- Кушнір Є. В. студент Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ПРОФІЛЮ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ІНСТРУМЕНТОМ З ВЕЛИКИМ ВІЛЬОТОМ

**Мета роботи.** Дослідити механізм формування профілю обробленої поверхні при фрезеруванні інструментом з великим вильотом

**Методи дослідження.** Застосовували експериментальний метод з використанням спеціального стенду, який дозволяє моделювати пружну систему деталі з різними динамічними властивостями, записувати осцилограми коливання деталі та інструменту в процесі різання. Фрезерування виконували фрезою з режимами різання, при яких виникають автоколивання. Для визначення закономірностей руху деталі та інструменту застосовували метод суміщення фрагментів осцилограм.

**Отримані результати.** Досліджено схему формування профілю обробленої поверхні в умовах фрезерування з автоколиваннями інструментом з великим вильотом. Встановлено, що вільні коливання інструменту після виходу зуба із зони різання мають більшу, ніж у деталі, інтенсивність. Це впливає на положення точки врізання на поверхні різання. Для визначення періоду та розмаху автоколивань фрези та деталі виконано спрямування ділянки осцилограми з автоколиваннями за допомогою фільтра Савицького-Галяя. Порівняння з поверхнею різання ділянок осцилограми деталі та інструменту при фрезеруванні показало, що ідентичною їй є форма коливань фрези. За результатами експериментальних досліджень було визначено відхилення від лінії пружної рівноваги першої хвилі автоколивань фрези і побудовано графік його зміни. Виконані дослідження підтвердили раніше встановлений вплив на формоутворення обробленої поверхні відхилення від положення пружної рівноваги першої хвилі автоколивань при зустрічному фрезеруванні.

**Наукова новизна.** Встановлено, що профіль обробленої поверхні при фрезеруванні кінцевими фрезами з великим вильотом безпосередньо пов'язаний з відхиленням інструменту від положення пружної рівноваги при автоколиваннях.

**Практична цінність.** Отримані результати показують вплив інструменту з великим вильотом на формування обробленої поверхні при фрезеруванні з автоколиваннями.

**Ключові слова:** фрезерування, автоколивання, поверхня різання, тонкостінний елемент деталі, осцилограма.

### Вступ

Деталі складних конструкцій в сучасних машинах, конструкції пресформ висувають особливі вимоги до інструменту, що використовується. При цьому актуальним є забезпечення якості обробки поверхонь, що виконуються кінцевими фрезами з великим вильотом в умовах дії автоколивань. Діапазон швидкостей, де вони виникають [1], охоплює чорнову і напівчистову обробки. Похибки, що утворюються при цьому на обробленій поверхні, як спадковість, переносяться на чистову операцію.

### Аналіз досліджень і публікацій

Публікації про автоколивання в більшості розглядають фрезерування та формоутворення обробленої поверхні тонкостінних деталей [2–10]. Однак, кінцеве фрезерування інструментом з великим вильотом вивчено недостатньо.

### Ціль роботи

Дослідити механізм формування профілю обробленої поверхні інструментом з великим вильотом в умовах фрезерування з автоколиваннями.

### Виклад основного матеріалу та аналіз отриманих результатів

Експериментальні дослідження проводили на спеціальному стенді [11]. Він дозволяє моделювати пружну систему деталі із різними динамічними властивостями (рис. 1).

При кінцевому фрезеруванні деталі 2, закріпленої на пружній пластині 3, інструментом 1 за допомогою індуктивних датчиків 4 і 5 записувалися їх коливання. Характеристики фрези та деталі наведено в табл. 1. У табл. 2 записано режими різання при проведенні досліджень фрезерування з автоколиваннями в третій швидкісній зоні коливань [1].



**Рис. 1.** Стенд для проведення досліджень:  
1 – фреза; 2 – оброблювана деталь; 3 – пружна пластина;  
4 – датчик інструменту; 5 – датчик деталі; 6 – корпус стенду

**Таблиця 1** – Характеристики фрези та деталі

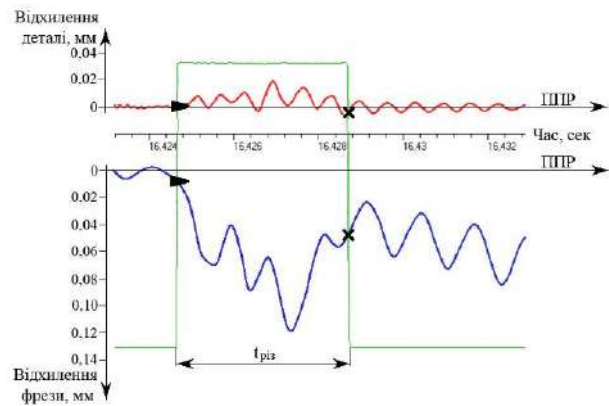
Параметри	Фреза	Деталь
Діаметр фрези, мм	16	
Довжина вільноту фрези із цанги, мм	120	
Число зубів фрези	1	
Жорсткість, Н/мм	1150	8620
Частота вільних коливань, Гц	781	1562
Логарифмічний декремент згасання вільних коливань	0,039	0,157
Матеріал, що обробляється		алюміній

**Таблиця 2** – Режими різання

Частота обертання шпинделя, $n$ , об/хв	Радіальна глибина, $a_e$ , мм	Осьова глибина різання, $a_p$ , мм	Подача на зуб, $S_z$ , мм	Примітка	
				Різання вільне	Подача зустрічна
1250	0,5	4	0,1		

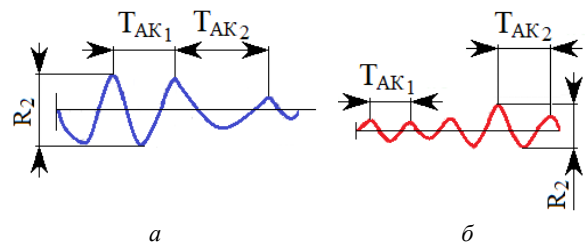
При фрезеруванні були записані коливання фрези та деталі. На рис. 2 наведено фрагмент осцилограми їх коливань. З нього видно, що деталь і фреза при різанні відхиляються в протилежні сторони від положення пружної рівноваги (ППР) і входять в зону різання за різних умов. Вільні коливання деталі, що виникають після попереднього різання, загасають до нового врізання в неї фрези. Вільні коливання інструменту після закінчення попереднього різання мають більшу, ніж у деталі, інтенсивність. До наступного врізання фрези в деталь вони знижується, але повністю не згасають. У деталь врізається інструмент, що коливається. Це впливає на положення точки врізання на поверхні різання. Для визначення періоду та розмаху автоколивань фрези та деталі виконано спрямування ділянки осцилограми з автоколиваннями за до-

помогою фільтра Савицького-Галея (рис. 3). Слід зазначити, що періоди автоколивань фрези і деталі неоднакові. При цьому величини періодів на початку різання і в кінці різні. Спочатку різання період автоколивань фрези  $T_{AK1} = 0,84 \cdot 10^{-3}$  с (1190 Гц), в кінці різання  $T_{AK2} = 1,28 \cdot 10^{-3}$  с (781 Гц). Період автоколивань деталі на початку різання  $T_{AK1} = 0,56 \cdot 10^{-3}$  с (1785 Гц), в кінці різання  $T_{AK2} = 0,68 \cdot 10^{-3}$  с (1470 Гц). Розмах автоколивань деталі  $R_2 = 0,021$  мм, розмах автоколивань фрези  $R_2 = 0,035$  мм.



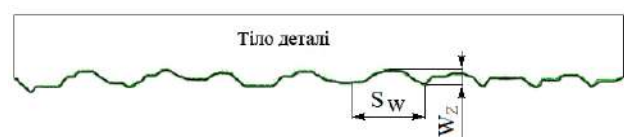
**Рис. 2.** Фрагмент осцилограми коливань деталі та фрези при різанні:

► – початок різання (врізання інструменту в деталь);  
× – закінчення різання (вихід інструменту з деталі);  
ППР – положення пружної рівноваги деталі та інструменту;  
 $t_{різ}$  – час різання



**Рис. 3.** Випрямлення осцилограми фільтром Савицького-Галея. Розмах  $R_2$  і період  $T_{AK}$  автоколивань: а – фрези; б – деталі

Після фрезерування з автоколиваннями оброблена поверхня має хвилястість з кроком  $S_w$ , рівним 1,77 мм і висотою  $W_z$ , рівною 0,043 мм (рис. 4). Вони отримуються як спадковість з хвилястої поверхні різання (рис. 5).



**Рис. 4.** Профілограма обробленої поверхні



Рис. 5. Поверхня різання при фрезеруванні з автоколиваннями

У роботі [12] зазначалося, що поверхня різання та фрагменти осцилограми з ділянками фрезерування за формою ідентичні. Тому зміни на зрізаних поверхнях різання можна спостерігати на записаній осцилограмі. Порівняння з поверхнею різання ділянок осцилограми деталі та інструменту при фрезеруванні (рис. 6) показує, що ідентичною їй є форма коливань фрези.

Хвилястість на поверхні різання впливає на зміну товщини шару, що зрізається і зміну руху деталі та інструменту при фрезеруванні. На підставі раніше

виконаних досліджень встановлено, що на формування обробленої поверхні при зустрічному фрезеруванні впливає відхилення від ППР першої хвилі автоколивань  $\Delta_{\text{проф}}$  [12]. При цьому величина відхилення періодично змінюється від найбільшого значення до найменшого. Для умов, за яких виконувалося дослідження, період повторюється через 18 різів. На рис. 7 показано, як на фрагментах осцилограм, записаних при першому, десятому і вісімнадцятому різі, змінюється відхилення від ППР першої хвилі автоколивань. При автоколиваннях деталі через її високу жорсткість  $\Delta_{\text{проф}}$  мають близькі значення (0,011 мм на першому різі, 0,013 мм на десятому різі, 0,010 мм на вісімнадцятому різі). При автоколиваннях фрези на наступному різі  $\Delta_{\text{проф}}$  зменшується. Якщо при першому різі воно дорівнювало 0,082 мм, то на вісімнадцятому 0,035 мм.

За результатами досліджень 80-ти різів для кожного з них було визначено відхилення від ППР першої хвилі автоколивань фрези та побудований графік його зміни (рис. 8).

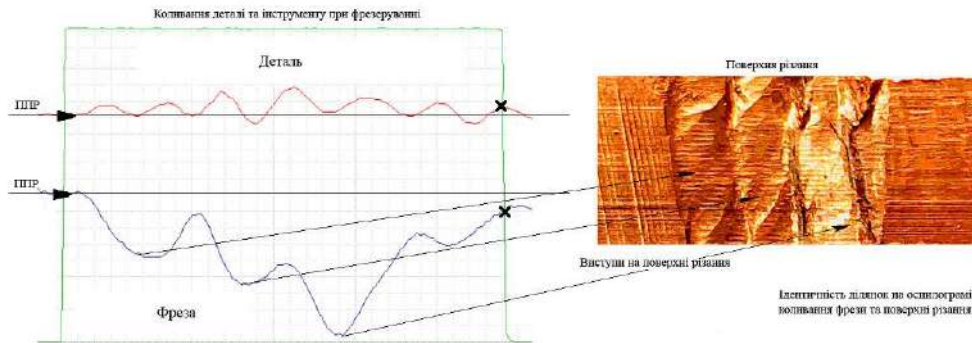


Рис. 6. Порівняння ділянки осцилограми з поверхнею різання

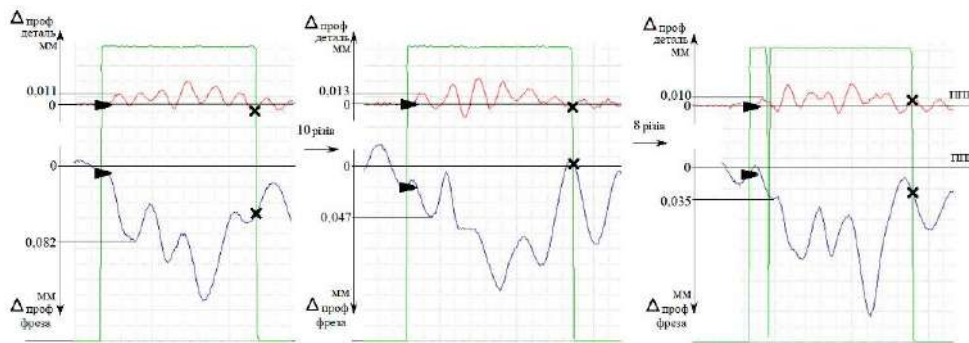


Рис. 7. Зміна відхилення від ППР першої хвилі авто коливань  $\Delta_{\text{проф}}$  у деталі та фрези

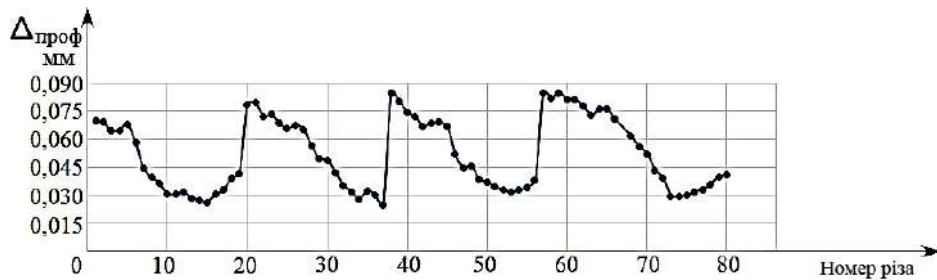


Рис. 8. Графік змін відхилення від ППР першої хвилі автоколивань фрези

Графік наочно показує, як частини поверхні різання з різними западинами відносно положення пружної рівноваги, що залишаються на обробленій поверхні, формують на ній хвилястість. При цьому крок хвилястості дорівнює періодичності зміни величини відхилення від ППР першої хвилі автоколивань. У дослідженнях він дорівнює 18-ти різам. При подачі на зуб, що дорівнює 0,1 мм, крок хвилястості буде 1,8 мм.

Висота хвилястості визначається як різниця між найбільшим і найменшим значенням відхилення від ППР першої хвилі автоколивань, вимірених за період їх зміни. У проведених дослідженнях ця різниця дорівнює 0,047 мм. Порівняння розрахованих значень кроку і висоти хвилястості обробленої поверхні за результатами вимірювання на ділянках різання осцилограми (1,8 мм і 0,047 мм) і визначених за профілограмою (1,77 мм і 0,043 мм) показує, що вони мають близькі значення. Похибка не перевищує 9 %. Це підтверджує результати раніше проведених досліджень про вплив на формоутворення обробленої поверхні відхилення від ППР першої хвилі автоколивань. Але при фрезеруванні з автоколиваннями деталі, яка жорсткіша, ніж фреза, формотворними є відхилення від ППР першої хвилі автоколивань інструменту.

### Висновки

Виконані дослідження підтвердили раніше встановлений вплив на формоутворення обробленої поверхні при зустрічному фрезеруванні відхилення від ППР першої хвилі автоколивань. Але для умов різання з автоколиваннями, коли деталь жорсткіша за інструмент, формотворними будуть відхилення від ППР фрези.

### Список літератури

1. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей. Монография / Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, В. А. и др. – Запорожье : ЗНТУ, 2017. – 208 с.
2. Features of Peripheral End milling: Formation of Machined Surface Profile / Dyadya S., Kozlova Ye., Germashev A. and etc. // International Conference on Avia-mechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019). – С. 184–188.
3. Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of

ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30.

4. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechincs, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas. – 2013. – 365 p.

5. Свинин В. М. Фрезерование с модулированной скоростью резания / В. М. Свинин ; под ред. А. И. Промптова. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. – 304 с.

6. Improved prediction of stability lobes with extended multi frequency solution / Daniel Bachrathy, Gabor Stepan // Manufacturing Technology 62 (2013). – P. 411–414.

7. Active fixturing: literature review and future research directions / O. J. Bakker, T. N. Papastathis, A. A. Popov and S. M. Ratchev // International Journal of Production Research. – 2013. – Vol. 51. – N 11. – P. 3171–3190.

8. An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling / I. Bediaga, J. Munoa, J. Hernandez, L.N. Lopez de Lacalle // International Journal of Machine Tools & Manufacture 49. – 2009. – P. 384–394.

9. Biermann D. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades / D. Biermann, P. Kersting, T. Surmann // Manufacturing Technology 59. – 2010. – P. 125–128.

10. Thin-Walled Part Machining Process Parameters Optimization based on Finite-Element Modeling of Workpiece Vibrations / S. Bolsunovskiy, V. Vermel, G. Gubanov and etc. // Procedia CIRP 8. – 2013. – P. 276–280.

11. Пат. UA 94974 Україна, МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02, Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей / Логомінов В. О., Гермашев А. І., Дядя С. І., Козлова О. Б. ; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – u 201405981 ; заявл. 02.06.2014 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.

12. Дядя С. И. Исследование формирования обработанной поверхности тонкостенного элемента детали при концевом цилиндрическом фрезеровании с автоколебаниями / С. И. Дядя // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 12. – С. 5–18.

Одержано 07.12.2021

**Дядя С. И., Козлова Е. Б., Кушнир Е. В. Исследование образования профиля обработанной поверхности при концевом фрезеровании инструментом с большим вылетом**

**Цель работы.** Исследовать механизм формирования профиля обработанной поверхности при фрезеровании инструментом с большим вылетом

**Методы исследования.** Для проведения исследований применяли экспериментальный метод с использованием специального стенда, который позволяет моделировать упругую систему детали с разными динамическими свойствами, записывать осциллограммы колебания детали и инструмента в процессе резания. Фрезерование выполняли фрезой с режимами резания, при которых возникают автоколебания. Для определения закономерностей движения детали и инструмента применяли метод совмещения фрагментов осциллограмм.

**Полученные результаты.** Исследована схема формирования профиля обработанной поверхности в условиях фрезерования с автоколебаниями инструментом с большим вылетом. Установлено, что свободные колебания фрезерования с автоколебаниями инструментом с большим вылетом. Установлено, что свободные колебания инструмента после выхода зуба из зоны резки обладают большей, чем у детали, интенсивностью. Это влияет на положение точки врезания на поверхности резания. Для определения периода и размаха автоколебаний фрезы и детали выполнено спрямление участка осциллограммы с автоколебаниями с помощью фильтра Савицкого-Галя. Сравнение с поверхностью резания участков осциллограммы детали и инструмента при фрезеровании показало, идентичную ей форму колебаний фрезы. По результатам экспериментальных исследований было определено отклонение от линии упругого равновесия первой волны автоколебаний фрезы и построен график его изменения. Выполненные исследования подтвердили ранее установленное влияние на формообразование обработанной поверхности отклонения от положения упругого равновесия первой волны автоколебаний при встречном фрезеровании.

**Научная новизна.** Установлено, что профиль обработанной поверхности при фрезеровании концевыми фрезами с большим вылетом напрямую связан с отклонением инструмента от положения упругого равновесия при автоколебаниях.

**Практическая ценность.** Полученные результаты показывают влияние инструмента с большим вылетом на формирование обработанной поверхности при фрезеровании с автоколебаниями.

**Ключевые слова:** фрезерование, автоколебания, поверхность резания, тонкостенный элемент детали, осциллограмма.

**Dyadya S., Kozlova Ye., Kushnir Ye. Investigation of the formation of a machined surface profile during end milling with a tool with a long overhang**

**Purpose.** Investigate the mechanism of forming the profile of the machined surface when milling with a tool with a long overhang.

**Methodology.** Experimental method was used with a special stand, which makes it possible to simulate an elastic system of a part with different dynamic properties, record oscillograms of oscillations of a part and a tool during the cutting process. Milling was performed with a milling cutter with cutting modes in which self-oscillations occur. To determine the patterns of movement of the part and the tool, the method of aligning the fragments of oscillograms was used.

**Results.** The scheme of the formation of the profile of the machined surface under the conditions of milling with self-oscillations by a tool with a long overhang has been investigated. It was found that the free vibrations of the tool after the tooth leaves the cutting zone have a higher intensity than that of the part. This affects the position of the infeed point on the cutting surface. To determine the period and range of self-oscillations of the cutter and the part, the section of the oscillogram with self-oscillations was straightened using the Savitsky-Galei filter. Comparison with the cutting surface of the sections of the oscillogram of the part and the tool during milling showed an identical vibration mode of the cutter. Based on the results of experimental studies, the deviation from the line of elastic equilibrium of the first wave of self-oscillation of the cutter was determined and a graph of its change was plotted. The studies performed have confirmed the previously established effect of deviation from the elastic equilibrium position of the first self-oscillation wave during counter milling on the shaping of the treated surface.

**Originality.** It has been established that the profile of the machined surface when milling with long overhang end mills is directly related to the deviation of the tool from the elastic equilibrium position during self-oscillation.

**Practical value.** The obtained results show the effect of a tool with a long overhang on the formation of a machined surface during milling with self-oscillation.

**Key words:** milling, self-oscillation, cutting surface, thin-walled detail element, oscillogram.