

С.С. Добротворський, д-р техн. наук, Л.Г. Добровольська, канд. техн. наук,
С.М. Кононенко, Харків, Україна

АНАЛІЗ ВІДХИЛЕНЬ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ ЖОРСТКІСТЮ

У даній роботі розглядається спосіб аналізу геометричних відхилень в процесі кінцевого фрезерування тонкостінних деталей з нерівномірною малою жорсткістю. Наводиться спрощена модель пружної деформації відповідного зразка. Встановлено розрахункове значення відхиляючої компоненти сили різання. Виконано моделювання відхилень критичних точок тонкостінного зразка малої жорсткості.

Ключові слова: нерівномірна жорсткість, пружна деформація, тонкостінні елементи, небажані відхилення.

В данной работе рассматривается способ анализа геометрических отклонений в процессе концевого фрезерования тонкостенных деталей с неравномерной малой жесткостью. Приводится упрощенная модель упругой деформации соответствующего образца. Вычислено расчетное значение отклоняющей компоненты силы. Произведено моделирование отклонений критических точек тонкостенного образца малой жесткости.

Ключевые слова: неравномерная жесткость, упругая деформация, тонкостенные элементы, нежелательные отклонения.

In this paper, a method for analyzing geometric stiffness in the process of end milling of thin-walled parts with uneven small rigidity is considered. A simplified model of elastic deformation of a corresponding sample is given. The value of the deflecting component of the cutting force is calculated. The deflections of the critical points of a thin-walled low stiffness sample are simulated.

Key words: variable stiffness, elastic deformation, thin-walled elements, undesirable deflections.

Вступ. Постановка проблеми.

Тонкостінні елементи в геометрії деталей, типу лопаток турбін, імперелів, крильчаток, та інших, повинні максимально відповідати технологічним вимогам. Адже такі деталі незамінні в авто-, авіа-, аерокосмічній галузі та зустрічаються в безлічі вузлів приводів, є відповідальними деталями механізмів.

Чинниками, що перешкоджають досягненню технологічних вимог до тонкостінного виробу є: відхилення від заданої форми в процесі обробки, вібрації, теплові деформації, похибки, що вносяться інструментом, обладнанням. В роботі основна увага приділяється моделюванню складних для розрахунку процесів, як етапу проектування з метою зменшення небажаних відхилень.

Аналіз останніх досліджень.

У процес аналізу складно-профільних тонкостінних деталей впроваджується експериментальна діяльність на основі систематичного

вимірювання параметрів, у вигляді відгуку системи і отримання значень сил різання, а так само шорсткості поверхні. Проводиться варіювання отриманих значень і пошук залежностей [1].

Застосовуються методи математичного аналізу дискретного моделювання динамічних фрезерних систем. Кінцеві фрези та тонкостінні деталі діляться на диференціальні елементи уздовж осі. Динамічна фрезерна система моделюється матрицею диференціальних рівнянь, які використовуються для прогнозування складових процесу різання [2].

Проводяться дослідження спрямовані на виявлення початкових напружень в структурі матеріалу зразків. Адже деформація елементів деталі сильно пов'язана зі станом залишкової напруги, викликаній виробничими процесами, такими як термообробка, формування або механічна обробка. Кожен крок процесу впливає на початковий стан напруги на наступному етапі процесу. Для тонкостінних елементів потенціал деформацій є особливо важливим фактором [3].

В якості технологічного рішення для зменшення небажаних відхилень геометрії деталей, у цій роботі зосереджено увагу на моделюванні виникаючих відхилень за допомогою кінцево-елементного аналізу.

Метою роботи є отримання і оцінка величин небажаних відхилень для визначення можливості подальшого використання у компенсаційній моделі керуючої програми.

Модель відхилення тонкостінного елемента.

При обробці тонкостінного елемента кінцевою фрезою виникають небажані відхилення в напрямку сили тиску фрези на поверхню. Додаткова складність розрахунку відхилень обумовлена нерівномірним розподілом жорсткості в кожному перетині, тому що геометрія тонкостінного елемента, подібного авіаційної лопатці, являє собою фігуру, з більшою товщиною біля основи і звужується у кінці.

Спрощена модель представлена у вигляді пружної консольної балки [4], [5] і розглядається для найбільш критичного моменту, коли виникають максимальні відхилення при тиску фрези на кінець вільної точки зразка [6] (рис. 1).

Основою для формального вираження моделі відхилення служить друга теорема Кастильяно (метод визначення зсувів лінійно-пружної системи на основі часткових похідних

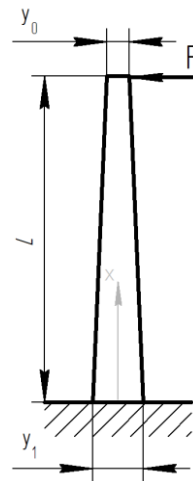


Рисунок 1 – Модель зразка

енергії), яка проголошує, що переміщення точки прикладання узагальненої сили у напрямку її дії дорівнює частковій похідній від потенційної енергії деформації по цій силі:

$$\Delta = \frac{\partial U_c}{\partial F} \quad (1)$$

Узагальнена енергія деформації вигину:

$$U_c = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx \quad (2)$$

Модуль Юнга E - міра жорсткості матеріалу [7]. Момент вигину M і момент інерції I :

$$M = Fx \quad (3)$$

$$I = \frac{b(y_0 + \alpha x)^3}{12}, \quad (4)$$

де b - ширина балки. Міра збільшення товщини α може бути розрахована, як $(y_1 - y_0)/L$. Об'єднуючи вирази в рівняння Кастільяно, величина відхилення:

$$\Delta = \frac{F}{E} \int_0^L \frac{x^2}{I} dx = \frac{12F}{Eb} \int_0^L \frac{x^2}{(y_0 + \alpha x)^3} dx \quad (5)$$

Відхиляюча сила різання.

Для визначення сили діючої в поперечному перерізі зразка, необхідно виконати розрахунок окружної сили. Окружна сила F_z і поперечна F_v знаходяться в співвідношенні, як $F_z: F_v = 0,7-0,9$.

В результаті розрахунків, при глибині різання $t = 0,25$ мм, ширині різання $B = 3$ мм, діаметрі ділянки контакту фрези $D = 7,5$ мм, і матеріалі - алюмінієвий сплав, значення окружної сили склало $F_z = 263,2$ Н. Відповідно до співвідношення, розрахункове значення поперечної сили становить $F_v = 210,5$ Н.

Кінцево-елементний аналіз.

Зразок тонкостінного елемента з нерівномірною малою жорсткістю був розроблений та імпортований в програму кінцево-елементного аналізу. Довжина L тонкостінної частини зразка становить 70 мм. Ширина $b = 40$ мм. Товщина біля основи y_1 та на кінці y_0 складають 8,75 мм та 3,75 мм відповідно. Матеріал – алюмінієвий сплав.

Одним із основних параметрів, що цікавлять в рамках поставленого завдання, це відхилення тонкостінного елемента в напрямку осі Y .

Розглянемо шість точок на поверхні (рис. 2), п'ять з яких, є критичними – вони знаходяться на краях зразка і максимально віддалені від місця фіксації. Отже, в цих точках імовірно буде спостерігатися максимальне відхилення від початкового стану. Розташування точок обумовлено передбачуваними лініями зняття припуску.

Навантажуючи критичні точки послідовно, можна оцінити величину відхилень у кожній області. Напрямок сил встановлюється уздовж осі Y локальних систем координат. Вісь Y перпендикулярна поверхні зразка. Значення відхилень, обраних на різних рівнях, відрізняються, це обумовлено нерівномірним розподілом жорсткості зразка [8].

Значення, отримані кінцево-елементним аналізом, дозволяють оцінити ступінь максимального відхилення зразка в різних зонах. (рис. 3, а, б). Результати аналізу наведено в таблиці 1. Максимальна величина відхилення для товщини зразка 3,75 мм у точці 1 та 3 - 0,095 мм.

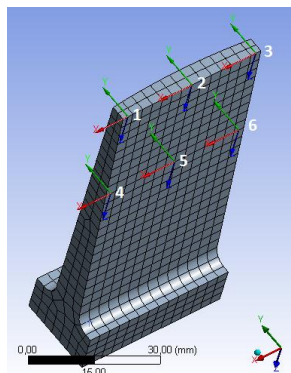
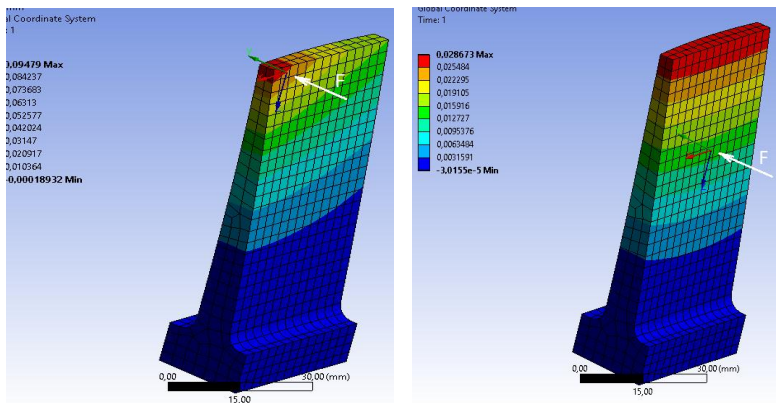


Рисунок 2 – Критичні точки



а)

б)

Рисунок 3 – Відхилення різних критичних точок зразка
а) відхилення у точці 1 - 0,095 мм; б) відхилення у точці 5 - 0,029 мм

Таблиця 1 – Величини відхилень

Критичні точки	1	2	3	4	5	6
Відхилення, мм	0,095	0,076	0,095	0,035	0,029	0,035

Перспективи подальших досліджень.

Представлений метод має перспективу використання для створення компенсаційної моделі керуючої програми, яка враховує геометрію тонкостінного елементу. Крім того, САЕ аналіз дозволяє застосовувати дану методику для прогнозування інших характеристик якості поверхні.

Висновки.

У даній роботі запропоновано метод оцінки відхилень при обробці тонкостінного зразку з нерівномірною малою жорсткістю. Наведено формально виражену модель. Визначено компоненти сили різання. Розраховано як осьову силу F_z , так і поперечну F_v , яка становить 210,5 Н. Максимальне відхилення в тонкій області елементу становить 0,095 мм.

Встановлено, що кінцево-елементний аналіз дозволяє отримати величини та ступінь відхилень в різних областях зразка.

Список використаних джерел: 1. Gururaj Bolar, Argha Das, Shrikrishna N. Joshi. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components / Measurement 121, June 2018, pp. 190–204. 2. C. Eksioglu, Z. M. Kilic and Y. Altintas. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems / Journal of Manufacturing Science and Engineering 134(6):061006, Nov. 12, 2012. 3. V. Schulze, P. Arrazola, F. Zanger, J. Osterried. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components / Procedia CIRP, 2013, pp. 45-50. 4. “An application of castigliano's second theorem with octave”. URL: <http://www.leancrew.com/all-this/2009/10/an-application-of-castilianos-second-theorem-with-octave/> (дата звернення: 02.06.2018). 5. “Revisiting Castigliano with SciPy”. URL: <http://leancrew.com/all-this/2013/01/revisiting-castigliano-with-scipy/> (дата звернення: 03.06.2018). 6. Доброворский С.С., Басова Е.В., Кононенко С.Н. Усовершенствование технологии фрезерования деталей с неравномерной жесткостью / Сб. науч. тр. «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии» № 72. Харьков: «ХАИ», 2016. С. 105–111. 7. Karl-Heinrich Grote, Erik K. Antonsson, Springer Handbook of Mechanical Engineering, 2009. 8. “Computing Stiffness of Linear Elastic Structures: Part 1”. URL: <https://comsol.com/blogs/computing-stiffness-linear-elastic-structures-part-1/> (дата звернення: 08.06.2018).

Bibliography (transliterated): 1. Gururaj Bolar, Argha Das, Shrikrishna N. Joshi. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components / Measurement 121, June 2018, pp. 190–204. 2. C. Eksioglu, Z. M. Kilic and Y. Altintas. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems. Journal of Manufacturing Science and Engineering 134(6):061006, November 12, 2012. 3. V. Schulze, P. Arrazola, F. Zanger, J. Osterried. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components. Procedia CIRP, 2013, pp. 45-50. 4. “An application of castigliano's second theorem with octave”. URL: <http://www.leancrew.com/all-this/2009/10/an-application-of-castilianos-second-theorem-with-octave/> (accessed: 02.06.2018). 5. “Revisiting Castigliano with SciPy”. URL: <http://leancrew.com/all-this/2013/01/revisiting-castigliano-with-scipy/> (accessed: 03.06.2018). 6. Dobrovorskiy S.S., Basova Y.V., Kononenko S.N. Usovershenstvovanie tehnologii frezzerovaniya detalej s neravnomernoj zhestkost'ju / Sb. науч. тр. «Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tehnologii» № 72. Har'kov: «HAI», 2016. S. 105–111. 7. Karl-Heinrich Grote, Erik K. Antonsson, Springer Handbook of Mechanical Engineering, 2009. 8. “Computing Stiffness of Linear Elastic Structures: Part 1”. URL: <https://comsol.com/blogs/computing-stiffness-linear-elastic-structures-part-1/> (accessed: 08.06.2018).

Поступила в редколлегию 25.06.2018