

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОНОНЕНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.914

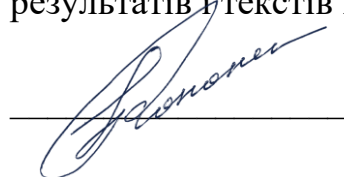
ДИСЕРТАЦІЯ
ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО
ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ
ЖОРСТКІСТЮ ПРИ КЕРУВАННІ ВЕЛИЧИНОЮ ПРИПУСКУ

Спеціальність G9 Прикладна механіка

Галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



С. М. Кононенко

Науковий керівник:

Добротворський Сергій Семенович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Кононенко С. М. Технологічне забезпечення високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю при керуванні величиною припуску. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю G9 Прикладна механіка. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання підвищення геометричної точності деталей з нерівномірною малою жорсткістю під час високошвидкісного фрезерування шляхом зменшення пружних відхилень на основі керування величиною припуску. Особливу увагу приділено дослідженню закономірностей виникнення статичних і динамічних похибок формоутворення, розробленню математичних моделей відхилень деталей малої жорсткості, адаптивного алгоритму гідродинамічної підтримки та засобів цифрового технологічного забезпечення процесу обробки.

Об'єкт дослідження – процес формування геометричної точності деталей малої жорсткості при високошвидкісному фрезеруванні.

Предмет дослідження – залежність геометричної точності деталей малої жорсткості від параметрів технологічного забезпечення високошвидкісного фрезерування та керування величиною припуску.

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю шляхом зменшення пружних відхилень на основі керування величиною припуску із застосуванням допоміжного гідродинамічного впливу в процесі обробки.

У *вступі* обґрунтовано актуальність розробки нових методів прогнозування та мінімізації пружних деформацій, що виникають під дією сил різання при високошвидкісному фрезеруванні деталей малої жорсткості. Показано значення таких деталей для енергетичного, авіаційного та

аерокосмічного машинобудування. Окрему увагу приділено встановленню закономірностей впливу методів фрезерування на параметри геометричної точності та якості поверхневого шару деталей складного профілю. Наведено зв'язок роботи з науковими програмами, науково-дослідними роботами. Визначено мету, об'єкт, предмет та задачі дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, описано методи дослідження. Наведено особистий внесок здобувача, відомості про апробацію матеріалів дисертації та показники публікацій, структуру та обсяг роботи.

У *першому* розділі виконано аналіз сучасного стану технологій виготовлення деталей з нерівномірною малою жорсткістю. Розглянуто особливості обробки лопаток турбін, імпелерів, крильчаток та інших деталей, для яких характерні значні пружні деформації під дією сил різання. Проведено класифікацію деталей малої жорсткості та технологічних деформацій за регулярністю прояву. Визначено конструктивні обмеження і критичні напрямки відхилень, що виникають при виготовленні лопаток турбомашин. Проаналізовано існуючі підходи до підвищення точності обробки, зокрема застосування спеціальних пристосувань, цифрових засобів підготовки виробництва та методів компенсації похибок. Встановлено обмеження існуючих рішень і обґрунтовано доцільність використання допоміжної гідродинамічної підтримки як засобу зменшення пружних відхилень деталей малої жорсткості.

У *другому* розділі розроблено математичні моделі технологічних процесів високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю. Удосконалено аналітичну модель статичного відхилення деталі, яка враховує прикладання сили різання в довільній точці вільної частини елемента малої жорсткості. Розроблено математичну модель визначення складових сили різання при бічному фрезеруванні з використанням класичної кругової моделі траєкторії руху ріжучої кромки. Запропоновано модель адаптивної гідродинамічної підтримки на основі керованого обтікання поверхонь та розроблено ітеративний алгоритм керування інтенсивністю підтримки залежно

від положення інструмента і величини відхилення деталі. Розглянуто теоретичні основи гармонічного відгуку пружної системи деталі малої жорсткості та впливу гідродинамічної підтримки на її динамічні характеристики.

У *третьому* розділі наведено методику дослідження технічних показників високошвидкісного фрезерування деталей малої жорсткості із застосуванням сучасних CAE-систем. За допомогою MCE та SPH-моделювання досліджено фізико-механічні процеси в зоні різання, визначено сили різання, напружено-деформований стан та температурні поля. Досліджено вплив стратегії перекриття проходів на точність формоутворення та параметри жорсткості поверхні. Встановлено, що застосування повного перекриття проходів забезпечує зниження максимального статичного відхилення деталі та сприяє згладжуванню міжпрохідних нерівностей. Виконано моделювання процесу гідродинамічної підтримки поверхонь деталей малої жорсткості та визначено закономірності зміни відхилень залежно від параметрів потоку. Проведено модальний аналіз і аналіз гармонічного відгуку пружної системи деталі малої жорсткості, визначено вплив параметрів гідродинамічної підтримки на амплітуди вимушених коливань та резонансні характеристики.

У *четвертому* розділі розглянуто питання програмної підтримки процесів високошвидкісного фрезерування деталей малої жорсткості. Визначено підходи до інформаційного технологічного забезпечення підготовки виробництва та розроблено програмний інструмент для вибору параметрів фрезерування. Реалізована архітектура програмного забезпечення поєднує аналітичні моделі прогнозування відхилень із можливостями CAE-систем.

У *висновках* наведено основні результати дисертаційної роботи щодо підвищення точності високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю за рахунок застосування допоміжної гідродинамічної підтримки. Наведено результати зменшення пружних відхилень та амплітуд вимушених коливань за застосування керованого

гідродинамічного обтікання поверхонь. Наведено результати застосування стратегії фрезерування з перекриттям проходів для деталей малої жорсткості.

За результатами дослідження отримано такі наукові результати:

- *вперше* запропоновано метод гідродинамічної підтримки деталей малої жорсткості на основі керованого обтікання поверхонь, що забезпечує мінімізацію пружних деформацій у процесі високошвидкісного фрезерування;

- *вперше* встановлено закономірності зміни зон мінімальних та максимальних амплітуд вимушених коливань деталей малої жорсткості залежно від частоти обертання, кількості зубів фрези та параметрів гідродинамічної підтримки. Показано, що керування цими параметрами забезпечує зниження амплітуд та зміщення резонансних частот у високочастотну область;

- *вперше* для деталей малої жорсткості встановлено закономірність впливу ступеня перекриття проходів на величину статичного відхилення та параметри мікрогеометрії поверхні;

- *удосконалено* аналітичну модель статичного відхилення деталей з нерівномірною малою жорсткістю шляхом врахування прикладання сили в довільній точці вільної частини;

- *удосконалено* ітеративний адаптивний алгоритм оброблення деталей малої жорсткості шляхом інтеграції моделі гідродинамічної підтримки, що зменшує та вирівнює похибки за різних положень інструменту.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- метод допоміжної гідродинамічної підтримки деталей малої жорсткості може бути реалізований на базі існуючого обладнання без залучення складного спеціального оснащення та забезпечує можливість швидкої модернізації виробництва;

- реалізація гідродинамічної підтримки у процесі високошвидкісного фрезерування забезпечує додаткове демпфування пружної системи деталі, що

сприяє зменшенню амплітуди коливань на 23,1% в досліджуваних умовах та розширенню діапазону робочих частот;

- застосування стратегії повного перекриття проходів, порівняно з частковим, як засобу зниження статичної складової похибки формоутворення, забезпечує зниження статичного відхилення деталі δ_{max} на 11,76% та сприяє ефективному згладжуванню міжпрохідних нерівностей;

- зниження напружено-деформованого стану в зоні різання, а також локальних температур створює передумови для підвищення стійкості ріжучого інструмента та ресурсу технологічного обладнання;

- розроблена методика визначення відхилень деталей з нерівномірною малою жорсткістю може бути використана у науково-дослідних і виробничих підрозділах підприємств при підготовці технологічних процесів виготовлення лопаток турбін, імпелерів, крильчаток та інших деталей малої жорсткості;

- розроблено програмний інструмент на основі запропонованих моделей і методів, який забезпечує визначення раціональних параметрів фрезерування та прогнозування відхилень деталей і може бути інтегрований у системи технологічної підготовки виробництва.

За результатами дослідження підтверджено теоретичну та практичну цінність розроблених моделей, методів і засобів технологічного забезпечення високошвидкісного фрезерування деталей малої жорсткості. Отримані результати підтвердили ефективність застосування методу гідродинамічної підтримки для зменшення пружних відхилень і підвищення геометричної точності обробки без необхідності суттєвої модернізації обладнання. Розроблені моделі, алгоритми та програмний інструмент можуть бути використані під час технологічної підготовки енергетичного, авіаційного та аерокосмічного виробництва. Надано рекомендації щодо вибору параметрів високошвидкісного фрезерування та реалізації адаптивної гідродинамічної підтримки залежно від характеристик деталі та умов обробки. Результати підтверджують досягнення мети дослідження та можливість практичного застосування для підвищення точності виготовлення деталей малої жорсткості.

Ключові слова: деталі малої жорсткості, технологічна підготовка, механічна обробка, високошвидкісне оброблення, методи різання, моделювання, 3D модель, режими різання, сили різання, динамічний процес, власні коливання, похибка оброблення, шорсткість поверхні, параметри якості, точність.

ABSTRACT

Kononenko S. M. Technological Assurance of High-Speed Milling of Thin-Walled Parts with Nonuniform Rigidity under Allowance Control. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Specialty G9 Applied Mechanics. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving the relevant scientific and practical problem of improving the geometric accuracy of parts with nonuniform rigidity during high-speed milling by reducing elastic deflections through allowance control and the application of auxiliary hydrodynamic surface support.

Attention is paid to investigating the mechanisms responsible for the occurrence of static and dynamic form-generation errors, developing mathematical models of deflections in low-rigidity parts, creating an adaptive hydrodynamic support algorithm, and designing digital technological support tools for the machining process.

The object of research is the process of forming the geometric accuracy of low-rigidity parts during high-speed milling.

The subject of research is the dependence of the geometric accuracy of low-rigidity parts on the technological support parameters of high-speed milling and allowance control.

The *aim* of the dissertation is to improve the accuracy of milling thin-walled parts with nonuniform rigidity by reducing elastic deflections through allowance control and the application of auxiliary hydrodynamic influence during machining.

The *introduction* substantiates the relevance of developing new methods for predicting and minimizing elastic deformations caused by cutting forces during high-speed milling of thin-walled parts. The significance of such components for power engineering, aviation, and aerospace industries is demonstrated. Particular attention is devoted to identifying the influence of milling methods on geometric accuracy and

surface-layer quality parameters of complex-profile parts. The relationship between the dissertation and ongoing scientific programs and research projects is presented. The aim, object, subject, and objectives of the study are formulated, while the scientific novelty, practical significance, and research methods are described. The author's personal contribution, information on the approbation of the dissertation results, publication activity, and the structure and scope of the dissertation are also presented.

Chapter 1 provides an analysis of the current state of manufacturing technologies for thin-walled parts with nonuniform rigidity. The machining features of turbine blades, impellers, fans, and other components prone to significant elastic deformations under cutting forces are examined. A classification of thin-walled parts and technological deformations according to the regularity of their occurrence is proposed. Design constraints and critical deviation directions arising during the manufacture of turbomachinery blades are identified. Existing approaches to improving machining accuracy, including special fixtures, digital manufacturing preparation tools, and error compensation methods, are analyzed. The limitations of existing solutions are established, and the feasibility of applying auxiliary hydrodynamic support as a means of reducing elastic deflections in thin-walled parts is substantiated.

Chapter 2 develops mathematical models of high-speed milling processes for parts with nonuniform rigidity. An analytical model of static part deflection is further developed by considering the application of cutting force at an arbitrary point of the free section of a thin-walled element. A mathematical model for determining cutting-force components during side milling based on the classical circular trajectory model of the cutting edge is developed. A model of adaptive hydrodynamic support based on controlled surface flow is proposed, and an iterative algorithm for regulating support intensity depending on tool position and part deflection magnitude is developed. The theoretical foundations of the harmonic response of the elastic system of a thin-walled part and the influence of hydrodynamic support on its dynamic characteristics are considered.

Chapter 3 presents a methodology for investigating the technical characteristics of high-speed milling of thin-walled parts with nonuniform rigidity using modern CAE systems. Finite Element Method (FEM) and Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) simulations are employed to study physical and mechanical processes in the cutting zone, determine cutting forces, evaluate stress–strain states, and analyze temperature fields. The influence of tool-path overlap strategy on form-generation accuracy and surface roughness parameters is investigated. It is established that a full-overlap strategy reduces maximum static deflection and contributes to smoothing inter-pass irregularities. Hydrodynamic surface-flow simulations are performed to determine the patterns of deflection variation depending on flow parameters. Modal and harmonic response analyses of the elastic system of thin-walled parts are conducted, and the influence of hydrodynamic support parameters on forced-vibration amplitudes and resonance characteristics is determined.

Chapter 4 addresses issues related to digital support of high-speed milling processes for thin-walled parts. Modern approaches to the digitalization of manufacturing process planning are analyzed, and a software tool for selecting milling parameters is developed. The implemented software architecture combines analytical deflection-prediction models with the capabilities of CAE systems.

The *conclusions* summarize the main results of the dissertation aimed at improving the accuracy of high-speed milling of thin-walled parts with nonuniform rigidity through allowance control and auxiliary hydrodynamic support. The possibility of reducing elastic deflections and forced-vibration amplitudes through controlled hydrodynamic surface flow is demonstrated. Recommendations for selecting technological process parameters are substantiated.

The following scientific results were obtained:

- for the first time, a method of hydrodynamic support for thin-walled parts based on controlled fluid flow around their surfaces has been proposed, providing minimization of elastic deformations during high-speed milling;

- for the first time, the regularities governing the variation of zones with minimum and maximum amplitudes of forced vibrations in thin-walled parts have been established as functions of spindle rotational speed, cutter tooth number, and hydrodynamic support parameters. It has been shown that controlling these parameters reduces vibration amplitudes and shifts resonance frequencies toward the high-frequency range;

- for the first time for thin-walled parts, the relationship between the degree of toolpath overlap and the magnitude of static deflection as well as the surface microgeometry parameters has been established;

- the analytical model of static deflection of parts with non-uniform low rigidity has been improved by accounting for the application of force at an arbitrary point of the free section;

- the iterative adaptive machining algorithm for thin-walled parts has been improved through the integration of a hydrodynamic support model, which reduces and equalizes machining errors for different tool positions.

The practical significance of the obtained results is as follows:

- the proposed auxiliary hydrodynamic support method can be implemented using existing equipment without the need for sophisticated dedicated tooling and enables rapid modernization of production facilities;

- the implementation of hydrodynamic support during high-speed milling provides additional damping of the elastic system, reducing vibration amplitudes by 23.1% under the investigated conditions and extending the operating frequency range;

- the application of a full-overlap milling strategy, compared with partial overlap, as a means of reducing the static component of form-generation error decreases the maximum static deflection δ_{max} by 11.76% and effectively smooths inter-pass irregularities;

- reducing the stress-strain state and local temperatures in the cutting zone increases tool life and extends the service life of technological equipment;

- the developed methodology for determining deviations of thin-walled parts with nonuniform rigidity can be used by research and industrial organizations in the preparation of technological processes for manufacturing turbine blades, impellers, fans, and other low-rigidity components;

- a software tool based on the proposed models and methods has been developed to determine rational milling parameters and predict part deviations, and it can be integrated into manufacturing process planning systems.

The research results confirm the theoretical and practical value of the developed models, methods, and technological support tools for high-speed milling of parts with nonuniform rigidity. The obtained results demonstrate the effectiveness of auxiliary hydrodynamic support as a means of reducing elastic deflections and improving geometric accuracy without requiring substantial modernization of existing manufacturing equipment. The developed mathematical models, algorithms, and software tools can be applied in the technological preparation of manufacturing processes for power engineering, aviation, and aerospace components. Recommendations for selecting high-speed milling parameters and implementing adaptive hydrodynamic support depending on part characteristics and machining conditions are provided. The achieved results confirm the attainment of the research objective and demonstrate the possibility of practical application for improving the manufacturing accuracy of thin-walled parts under modern industrial conditions.

Keywords: thin-walled parts, technological preparation, mechanical processing, high-speed machining, cutting methods, modeling, 3D model, cutting conditions, cutting forces, dynamic process, natural oscillations, machining error, surface roughness, quality parameters, accuracy.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

Статті у наукових виданнях включених до міжнародних баз даних Scopus та/або Web of Science:

1. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Trubin, D., Talar, R.: Impact of Overlapping Method on Cutting Forces and Surface Formation in End Milling of Thin-Walled Parts. In: Pavlenko, D., et al. (eds) Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. LNME, vol. 1480, pp. 67–78. Springer, Cham, 2025. (Scopus, Швейцарія, Q4) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_7.

2. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Kharchenko, O., Trubin, D.: Adaptive Fluid Jet Support Technique for Variable Stiffness Thin-Walled Parts End Milling. In: Ivanov, V. et al. (eds.) DSMIE 2024 Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII, LNME, pp. 223–239. Springer, Cham, 2024. (Scopus, Швейцарія, Q4) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_19.

3. Pavlenko, I., Kononenko, S., Czernek, K., Witczak, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Ivanov, V., Krupińska, A., Matuszak, M., Włodarczak, S., Ochowiak, M.: An Increase in the Energy Efficiency of Axial Turbines by Ensuring Vibration Reliability of Blade. Energies 2023, 16(3), 1511. (Scopus, Швейцарія, Q2) DOI: <https://doi.org/10.3390/en16031511>.

4. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Kononenko, S., Dobrovolska, L., Mounif, A. S. Y.: A Special Feature of Turbine Blade Deformation During Machining. In: Ivanov V. et al. (eds.) DSMIE 2022, LNME, pp. 220–231. Springer, Cham, 2022. (Scopus, Швейцарія, Q4) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_22.

5. Dobrotvorskiy, S., Kononenko, S., Basova, Y., Dobrovolska, L., Ivanova, M.: Development of Optimum Thin-Walled Parts Milling Parameters Calculation Technique. In: Ivanov V. et al. (eds.) DSMIE 2021, LNME, pp. 343–352. Springer, Cham, 2021. (Scopus, Швейцарія, Q4) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_34.

6. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Dobrovolska, L., Yepifanov, V.: Simulation of Thin-walled Parts End Milling with Fluid Jet Support. In: V.

Ivanov et al. (eds.) DSMIE 2020, LNME, pp. 380–389. Springer, Cham, 2020. (Scopus, Швейцарія, Q4) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_37.

7. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Gasanov, M., Dobrovolska, L.: Deflections and Frequency Analysis in the Milling of Thin-walled Parts with Variable Low Stiffness. *Acta Polytechnica* 2019, 59(3), pp. 283–291. (Scopus, Чехія, Q2) DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0283>.

8. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Kononenko, S., Dobrovolska, L., Ivanova, M.: Numerical Deflections Analysis of Variable Low Stiffness of Thin-Walled Parts During Milling. In: Ivanov V. et al. (eds.) DSMIE 2019, LNME, pp. 43–53. Springer, Cham (2020). (Scopus, Швейцарія, Q4) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_5.

Статті у періодичних наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

9. Кононенко, С. М., Добротворський, С. С., Басова, Є. В., Добровольська, Л. Г. Розроблення програмного рішення для вибору параметрів фрезерування тонкостінних елементів турбомашин. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022. 1(52). С. 65–72. (Б) DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-65-72](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-65-72).

10. Кожушко А. П., Мітцель М. О., Карпов В. О., Кононенко С. М. Малишев С. Є. Аналіз та перспектива розвитку конструкцій трансмісійних установок ланцюгових землерийних засобів інженерно-будівельної техніки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. 2025. № 1. С. 119–128. (Б) DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2025.1.14>.

11. Добротворський С. С., Добровольська Л. Г., Кононенко С. М. Аналіз відхилень при кінцевому фрезеруванні деталей з нерівномірною малою жорсткістю. *Різання та інструмент в технологічних системах*. 2018. Вип. 89. С. 59–63. (фахове видання) URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/40379>.

12. Добротворський С. С., Кононенко С. М., Басова Є. В. Технологічне забезпечення високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*. 2018. № 6 (1282). С. 38–42. (фахове видання) URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/37173>.

13. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М. Удосконалення технології фрезерування деталей з нерівномірною жорсткістю. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2016. № 72. С. 105–111. (фахове видання) URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/23543>.

Опубліковані праці апробаційного характеру, що засвідчують наукові результати:

14. Добротворський С. С., Кононенко С. М., Рафал Талар. Розробка технології адаптивної гідроструминної підтримки торцевого фрезерування тонкостінних деталей змінної жорсткості для їх поверхневого структурування. *Нові технології в машинобудуванні* : матеріали доповідей Всеукр. конф., Харків, 4–7 верес. 2024. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2024. С. 44. URL: https://khai.edu/files/uploads/konferencii/34_materiali_konferencii_novi_tehnologii_u_masinobuduvanni_2024.pdf.

15. Добротворський С. С., Кононенко С. М., Басова Є. В. Добровольська Л. Г. Інтенсифікація процесів виготовлення тонкостінних елементів турбомашин шляхом застосування цифрових сервісів та технологій. *Прогресивні технології у машинобудуванні PTME-2022* : зб. наук. пр. X Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ-Яремче, 1–5 лют. 2022. С. 80–82. URL: https://www.masfak.ni.ac.rs/images/Konferencije_PedjaZivkovic/Zb_PTME2022.pdf#page=80.

16. Chelabi M. A., Basova Y., Dobrotvorskiy S., Kononenko S. Contribution to the design of turbine rotor of mixed flow turbine used in a turbocharger. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали IX Всеукр. наук.-техн.

конф. Суми, 19–22 квіт. 2022. Суми : Сумський державний університет, 2022. С. 33. URL: <https://conf.teset.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/04/stpv-2022.pdf>.

17. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М., Трубін Д. В., Пітель Я. Розробка програмного забезпечення для розрахунку параметрів обробки деталей з малою жорсткістю методом високошвидкісного фрезерування у рамках FREE DIGITAL SPACE FOR I. 4.0 (FGS2I4.0). *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей 28-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2020. Харків, 28-30 жовт. 2020 : у 5 ч. Харків : Планета-Прінт. Ч. 1. С. 114. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/69421>.

18. Басова Є. В., Добротворський С. С., Трубін Д. В., Кононенко С. М. Програмне та технологічне забезпечення для отримання технологічних параметрів процесу високошвидкісного фрезерування деталей змінної жорсткості з використанням методу скінчених елементів та web технологій. *Прогресивні напрямки розвитку автоматичних технологічних комплексів* : сб. тр. VII-ої МНТК, Луцьк, 28–30 трав. 2022. Луцький національний технічний університет, 2022. С. 164–165. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2023-02/2022_TK-2022_Збірник%20тез.pdf.

19. Кононенко С. М., Басова Е. В., Добротворський С. С., Горячев А. В. Технологічні показники високошвидкісного фрезерування деталей малої жорсткості в залежності від обраної стратегії. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XXIX міжнародної наук.-практ. конф. MicroCAD–2021, Харків. 18-20 трав. 2021 : у 5 ч. Харків : Планета-Прінт. Ч. 1. С. 100. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/68026>.

20. Кононенко С. М., Басова Є. В. Розробка методики розрахунку оптимальних параметрів багатолезвийного оброблення тонкостінних деталей. *Молодь: наука та інновації* : матеріали VIII Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених, Дніпро, 25–27 лист. 2020. Дніпро : НТУ

«Дніпровська політехніка», 2020. Т. 3. С. 5. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2020/Том3.pdf>.

21. Кононенко С. М., Добротворський С. С., Басова Є. В., Добровольська Л. Г., Едл М. Дослідження відхилень елементів деталей малої жорсткості та технологічні засоби їх зниження у процесі кінцевого фрезерування. *Прогресивні технології в машинобудуванні* : збірник наукових праць IX-ої МНТК, Львів-Плай, 3–7 лют. 2020. Львів : Львівська політехніка, 2020. С. 102. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/3/2/news/4951/zbirnyktez.pdf>.

22. Басова Є. В., Добротворський С. С., Кононенко С. М., Едл М., Рехор Я. Наукові основи виготовлення деталей машинобудування зі змінною жорсткістю методом високошвидкісного фрезерування з гідродинамічним обтіканням. *Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів* : сб. тр. VI-ої МНТК, Луцьк, 2–4 черв. 2020. Луцьк : ЛНТУ, 2020. С. 135–136. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/50433>.

23. Пониделко А. А., Басова Є. В., Кононенко С. М., Добротворський С. С. Технологічні проблеми виготовлення лопаток з урахуванням їхньої змінної жорсткості. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XXVII Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2019, Харків, 15–17 трав. 2019 : у 4 ч. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. Ч. 1. С. 142. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44200>.

24. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М. До питання вдосконалення технології фрезерування деталей із перемінною жорсткістю. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта* : тези доп. 25-ї МНТК MicroCAD–2017, Харків, 17–19 трав. 2017 : у 4 ч. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. Ч. 1. С. 107. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/38749>.

25. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М. До питання удосконалення технології фрезерування деталей з нерівномірною жорсткістю. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво* : матеріали 16-ї МНТК, Суми, 26–29 жовт. 2016. Суми : Сум. держ. ун-т., 2016. С. 15–17. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/50430>.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН, АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ І ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ ЖОРСТКІСТЮ.....	16
1.1 Загальні особливості і виклики виготовлення деталей малої жорсткості.....	16
1.2 Типи деталей малої жорсткості, методи виготовлення та види деформації	18
1.3 Визначення конструктивних обмежень, що виникають при виготовленні деталей малої жорсткості.....	22
1.4 Рекомендації щодо зменшення деформацій та напрями розвитку технології формоутворення деталей малої жорсткості.....	25
1.4.1 Спеціальні пристосування додаткової фіксації деталей малої жорсткості.....	27
1.4.2 Цифрові системи підготовки виробництва деталей малої жорсткості.....	38
Висновки за розділом 1	41
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ ЖОРСТКІСТЮ.....	42
2.1 Модель статичної складової відхилення деталі малої жорсткості.....	42
2.2 Визначення компонентів сили різання при бічному фрезеруванні деталей малої жорсткості	45
2.3 Засоби адаптивної обробки деталей малої жорсткості.....	51
2.3.1 Модель методу адаптивної гідродинамічної підтримки	56

2.3.2 Ітеративний адаптивний алгоритм зменшення похибки відхилення з використанням методу гідродинамічної підтримки.....	62
2.4 Теоретичні основи моделювання гармонічного відгуку пружної системи деталі за гідродинамічної підтримки.....	66
Висновки за розділом 2.....	69
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЇ ЖОРСТКОСТІ.....	70
3.1 Моделювання процесів механічної обробки в САЕ системах.....	70
3.2 Аналіз фізико-механічних показників високошвидкісного фрезерування деталей малої жорсткості	75
3.2.1 Прогнозування характеристик процесу різання з урахуванням моделей руйнування	76
3.3 Визначення сил різання за технології бічного фрезерування деталі малої жорсткості	80
3.4 Вплив стратегії фрезерування з перекриттям проходів на ступінь відхилення та мікрогеометрію поверхні	90
3.5 Моделювання впливу гідродинамічної підтримки на точність деталі малої жорсткості.....	95
3.6 Модальний та гармонічний аналіз відгуку пружної системи деталі малої жорсткості за гідродинамічної підтримки.....	102
Висновки за розділом 3.....	109
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЇ ЖОРСТКОСТІ.....	110
4.1 Передумови програмної реалізації засобів підтримки прийняття рішень при фрезеруванні деталей малої жорсткості.....	110
4.2 Задачі інформаційного забезпечення вибору параметрів фрезерування деталей малої жорсткості.....	113

4.3 Розроблення програмного інструменту для вибору параметрів фрезерування деталей малої жорсткості.....	114
Висновки за розділом 4.....	121
ВИСНОВКИ.....	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТОК А.....	139
ДОДАТОК Б.....	145
ДОДАТОК В.....	148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ВШФ – високошвидкісне фрезерування;

МСЕ – метод скінченних елементів;

СЕ – скінченний елемент;

ПС – пружна система;

ЧПК – числове програмне керування;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

CAM – Computer-aided Manufacturing (автоматизована система виробництва);

HMI – Human Machine Interface (людино-машинний інтерфейс);

AR/VR/MR – Augmented Reality (доповнена реальність) / Virtual Reality (віртуальна реальність) / Mixed Reality (змішана реальність);

SPH – Smoothed-particle Hydrodynamics (гідродинаміка згладжених частинок);

FCI – Fluid-structure Interaction;

CFD – Computational Fluid Dynamics;

FEM – Finite Element Method (метод скінченних елементів)

API – Application Programming Interface (інтерфейс прикладного програмування).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасному машинобудуванні, деталі, типу лопаток, імпелерів, коліс турбін, і інших, що мають елементи малої жорсткості в своїй геометрії, застосовуються в безлічі гідро- і пневмоприводів, двигунів, і є відповідальними деталями механізмів в авіаційній, аерокосмічній, енергетичній галузі. Застосування нових технологічних процесів та сучасних методів високошвидкісної обробки значно підвищує економічну ефективність та дає змогу досягти максимальної відповідності технічним вимогам.

Актуальність теми обумовлена тим, що на даний час, виготовлення деталей малої жорсткості складної геометрії з високою точністю, низькою шорсткістю поверхонь, структурною однорідністю, може бути виконано переважно із застосуванням фрезерної обробки. Зважаючи на те, що процес фрезерної обробки супроводжується значним впливом на пружну систему деталі малої жорсткості, без додатково розробленого технологічного забезпечення знизити небажані відхилення часто є неможливим. З точки зору існуючих адитивних технологій, вони поки що не забезпечують достатніх якісних показників і характеризуються високою вартістю.

Забезпечення необхідної геометричної точності часто потребує зниження інтенсивності режимів різання, що призводить до зменшення продуктивності обробки. Тому актуальним є пошук підходів додаткової стабілізації пружної системи деталі без суттєвого обмеження режимів обробки, зокрема шляхом застосування допоміжного гідродинамічного впливу на поверхню деталі в процесі фрезерування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі “Технологія машинобудування та металорізальні верстати” згідно з тематичними напрямами НТУ “ХП” та відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476 “Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових

досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні”: “Енергетика та енергоефективність: Енергоефективність і енергозбереження, ринки енергоресурсів”, та робіт за НДДКР “Розробка методології оптимального проектування та виготовлення високоефективних, високонадійних турбомашин з врахуванням різних режимів роботи” (ДР №0121U107511), “Формування і трансформація періодичних нановуглецевовмісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами” (ДР №0124U000481), “Наукове обґрунтування підходів до створення гібридних силових установок об’єктів інженерно-будівельної техніки” (ДР №0125U000240) за замовленнями Міністерства освіти і науки України, де автор був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю шляхом зменшення пружних відхилень на основі керування величиною припуску із застосуванням допоміжного гідродинамічного впливу в процесі обробки.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано наступні задачі:

- виконати аналіз методів технологічного забезпечення фрезерування деталей малої жорсткості;
- удосконалити класичний технологічний процес механічної обробки деталей малої жорсткості шляхом оптимізації технологічних параметрів та застосування допоміжного технологічного забезпечення;
- побудувати необхідні адекватні математичні моделі відхилення зразка малої жорсткості у процесі фрезерної обробки;
- виконати порівняння результатів на основі розрахункових побудованих моделей із моделями скінченно-елементного аналізу;
- узагальнити методикау та розробити рекомендаційну систему попереднього обирання технологічних параметрів з метою прогнозування небажаних відхилень.

Об'єкт дослідження – процес формування геометричної точності деталей малої жорсткості при високошвидкісному фрезеруванні.

Предмет дослідження – залежність геометричної точності деталей малої жорсткості від параметрів технологічного забезпечення високошвидкісного фрезерування та керування величиною припуску.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на наукових основах технології машинобудування, теоретичної механіки, теорії пружності, аналізі гармонічного відгуку пружної системи, прогнозуванні стійкої динамічної поведінки, визначенні здатності долати резонанс та інших небажаних впливів вимушених коливань.

Формалізація моделі відхилення на основі визначення переміщення через часткові похідні від потенціальної енергії системи базується на другій теоремі Кастільяно. Моделювання здійснено з урахуванням малих пружних деформацій вигину, що підпорядковуються закону Гука. Феноменологічний опис взаємодії конструкцій із гідродинамічним струменем реалізовано за допомогою моделі пружної основи Вінклера.

Відповідність результатів та використаних методів обумовлена застосуванням сучасних засобів інженерної автоматизації, що використовуються як у науково-дослідницькій діяльності, так і у промисловому виробництві.

Моделювання процесів у зоні високошвидкісної обробки, напружено-деформований стан зразка виконано за допомогою MCE та SPH-методу, із застосуванням таких програмних комплексів:

- при дослідженні власних частот, гармонічного відгуку пружної системи зразка малої жорсткості використано програмний пакет Ansys Workbench;
- при дослідженні напружено-деформованого стану, фізико-механічних, термодинамічних процесів в зоні високошвидкісної обробки; процесу гідродинамічного обтікання поверхні використано комплекс Abaqus Explicit.

Обробка результатів здійснена за допомогою системи автоматизованого математичного моделювання Mathcad Prime та комп'ютерно-інтегрованої системи розрахунків технічних параметрів власної розробки.

Наукова новизна отриманих результатів. Встановлено нові залежності геометричної точності деталей малої жорсткості від параметрів допоміжної гідродинамічної підтримки поверхонь у процесі високошвидкісної обробки. Зазначене досягнуто завдяки таким результатам:

- *вперше* запропоновано метод гідродинамічної підтримки деталей малої жорсткості на основі керованого обтікання поверхонь, що забезпечує мінімізацію пружних деформацій у процесі високошвидкісного фрезерування;

- *вперше* встановлено закономірності зміни зон мінімальних та максимальних амплітуд вимушених коливань деталей малої жорсткості залежно від частоти обертання, кількості зубів фрези та параметрів гідродинамічної підтримки. Показано, що керування цими параметрами забезпечує зниження амплітуд та зміщення резонансних частот у високочастотну область;

- *вперше* для деталей малої жорсткості встановлено закономірність впливу ступеня перекриття проходів на величину статичного відхилення та параметри мікрогеометрії поверхні;

- *удосконалено* аналітичну модель статичного відхилення деталей з нерівномірною малою жорсткістю шляхом врахування прикладання сили в довільній точці вільної частини;

- *удосконалено* ітеративний адаптивний алгоритм оброблення деталей малої жорсткості шляхом інтеграції моделі гідродинамічної підтримки, що зменшує та вирівнює похибки за різних положень інструменту.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені засоби технологічного забезпечення дозволяють підвищити геометричну точність виготовлення деталей малої жорсткості та розширити технологічні можливості високошвидкісного фрезерування, що є актуальним для енергетичного,

авіаційного та аерокосмічного машинобудування. Це забезпечується такими результатами:

- метод допоміжної гідродинамічної підтримки деталей малої жорсткості може бути реалізований на базі існуючого обладнання без залучення складного спеціального оснащення та забезпечує можливість швидкої модернізації виробництва;

- реалізація гідродинамічної підтримки у процесі високошвидкісного фрезерування забезпечує додаткове демпфування пружної системи деталі, що сприяє зменшенню амплітуди коливань на 23,1% в досліджуваних умовах та розширенню діапазону робочих частот;

- застосування стратегії повного перекриття проходів, порівняно з частковим, як засобу зниження статичної складової похибки формоутворення, забезпечує зниження статичного відхилення деталі δ_{max} на 11,76% та сприяє ефективному згладжуванню міжпрохідних нерівностей;

- зниження напружено-деформованого стану в зоні різання, а також локальних температур створює передумови для підвищення стійкості ріжучого інструмента та ресурсу технологічного обладнання;

- розроблена методика визначення відхилень деталей з нерівномірною малою жорсткістю може бути використана у науково-дослідних і виробничих підрозділах підприємств при підготовці технологічних процесів виготовлення лопаток турбін, імпелерів, крильчаток та інших деталей малої жорсткості;

- розроблено програмний інструмент на основі запропонованих моделей і методів, який забезпечує визначення раціональних параметрів фрезерування та прогнозування відхилень деталей і може бути інтегрований у системи технологічної підготовки виробництва.

Результати дослідження та методи впроваджено (Додаток В):

- у виробничу діяльність ТОВ “Технополіс Машинобудування”, м. Харків;
- у навчальний процес кафедри “Технологія машинобудування та металорізальні верстати” Національного технічного університету “ХПІ”.

Авторський внесок здобувача полягає в розробленні нових та удосконаленні існуючих моделей технічного забезпечення виготовлення деталей з нерівномірною малою жорсткістю, із застосування сучасних систем комп'ютерно-інтегрованого аналізу для прогнозування та імітаційного моделювання відповідних фізико-механічних процесів. Результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто та в співавторстві викладені у публікаціях (Додаток А):

1) статті включені до наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science:

[1] – здобувачем виконано постановку задачі, встановлення залежностей для визначення фактичної висоти нерівностей з урахуванням відхилень деталей; Добротворським С. С. сформовано напрям дослідження; Басовою Є. В. виконано верифікацію результатів; Трубіним Д. В. проведено аналіз вихідних даних; Таларом Р. здійснено наукове консультування.

[2] – здобувачем сформовано задачі дослідження, розроблено аналітичну модель прогнозування похибок обробки та адаптивний ітераційний алгоритм гідродинамічної підтримки; Добротворським С. С. сформовано напрям дослідження; Басовою Є. В. виконано верифікацію результатів; Харченком О. С. і Трубіним Д. В. здійснено аналіз вихідних даних.

[3] – здобувачем проведено скінченне та гармонічне моделювання процесу фрезерування лопаток осьових турбін; Павленком І. В. розроблено математичні моделі коливань лопаток; Добротворським С. С. виконано наукове консультування та інтерпретація результатів; Басовою Є. В. сформовано концепцію дослідження та здійснено наукове редагування; рештою співавторів проведено допоміжне опрацювання результатів.

[4] – здобувачем здійснено наукову інтерпретацію результатів геометричного аналізу відхилень; Добротворським С. С. сформовано напрям дослідження та аналітичну модель; Басовою Є. В. виконано верифікацію результатів; Добровольською Л. Г. здійснено наукове редагування; Муніфом А. проведено допоміжне опрацювання результатів.

[5] – здобувачем розроблено архітектуру та алгоритмічне забезпечення програмного інструменту для розрахунку оптимальних параметрів кінцевого фрезерування деталей малої жорсткості; Добротворським С. С. сформовано концепцію дослідження і визначено структуру; Басовою Є. В. виконано верифікацію результатів; Добровольською Л. Г. здійснено методичний супровід дослідження; Едлом М. проведено наукове консультування.

[6] – здобувачем розроблено аналітичну та чисельну модель для розрахунку параметрів гідродинамічної підтримки деталей малої жорсткості; Добротворським С. С. сформовано концепцію дослідження; Басовою Є. В. виконано верифікацію результатів; Добровольською Л. Г. проведено аналіз результатів; Єпіфановим В. В. здійснено наукове консультування.

[7] – здобувачем розроблено математичні моделі відхилень і сил різання при фрезеруванні, проведено частотний аналіз та гармонічний відгук; Добротворським С. С. сформовано концепцію дослідження; Басовою Є. В. виконано верифікацію результатів; рештою співавторів проведено методичний супровід дослідження.

[8] – здобувачу належить постановка мети і задач дослідження, теоретичне обґрунтування закономірностей деформації критичних точок деталей малої жорсткості; Добротворським С. С. сформовано напрям дослідження; Басовою Є. В. виконано верифікацію вихідних даних; Добровольською Л. Г. та Івановою М. С. проведено аналіз результатів.

2) фахові видання України:

[9] – здобувачу належить постановка задачі дослідження, розроблення концепції та архітектури програмного рішення для вибору параметрів фрезерування тонкостінних елементів турбомашин. Співавторами: Добротворським С. С. і Басовою Є. В. запропоновано алгоритм для вибору параметрів кінцевого фрезерування на основі цифрового підходу; Добровольською Л. Г. здійснено наукове редагування.

[10] – здобувачем виконано аналіз публікацій щодо моделювання, оптимізації параметрів та жорсткості робочих органів машин. Співавторами:

Кожушко А. П. сформовано концепцію дослідження, аналіз машин, конструкцій і перспектив розвитку трансмісійних систем; рештою співавторів узагальнено аналіз трансмісій, приводів і систем керування.

[11] – здобувачу належать постановка задачі дослідження, розроблення моделі відхилень при кінцевому фрезеруванні деталей з нерівномірною малою жорсткістю, розрахунки складових сил різання; Добротворським С. С. здійснено формування напряму дослідження, Добровольською Л. Г. виконано наукове редагування матеріалів.

[12] – здобувачем проведено аналіз силових факторів процесу високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю, розроблення моделі відхилень тонкостінних елементів й узагальнення результатів дослідження; Добротворським С. С. і Басовою Є. В. проведено наукову верифікацію результатів.

[13] – здобувачем проаналізовано технології фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю, розроблення підходу до вдосконалення технології обробки із застосуванням САЕ-систем; Добротворським С. С. здійснена наукова інтерпретація результатів; Басовою Є. В. проведено редакційне опрацювання матеріалів.

3) публікації апробаційного характеру:

[14] – здобувачем підготовлено матеріали для участі у конференції, запропоновано підхід до адаптивної гідроструминної підтримки фрезерування деталей нерівномірної жорсткості.

[15] – здобувачем досліджено можливості застосування цифрових сервісів та web-технологій для інтенсифікації процесів виготовлення тонкостінних елементів турбомашин.

[16] – здобувачем виконано верифікацію впливу конструктивних параметрів ротора турбіни змішаного потоку на ефективність турбокомпресора CFD-моделюванням.

[17] – здобувачем розроблено програмне забезпечення для розрахунку параметрів високошвидкісного фрезерування деталей з малою жорсткістю в межах концепції FGS2I4.0.

[18] – здобувачем досліджено застосування методу скінчених елементів та web-технологій для виробництва деталей з малою жорсткістю.

[19] – здобувачем виконано дослідження відхилень елементів деталей малої жорсткості у процесі кінцевого фрезерування.

[20] – здобувачем досліджено наукові основи високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю з використанням гідродинамічного обтікання.

[21] – здобувачем проаналізовано технологічні проблеми виготовлення лопаток з урахуванням їх нерівномірної жорсткості.

[22] – здобувачем досліджено вплив стратегій високошвидкісного фрезерування на технологічні показники.

[23] – здобувачем узагальнено методику розрахунку оптимальних параметрів багатолезвійної обробки деталей малої жорсткості.

[24] – здобувачем досліджено вдосконалення технології фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю із застосуванням CAE-систем.

[25] – здобувачем проаналізовано особливості фрезерування деталей із перемінною жорсткістю з використанням методів інженерного аналізу.

Апробацію матеріалів дисертації виконано представленням та обговоренням основних результатів на таких конференціях: XVI Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція “Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво” (Суми, 2016), XXIX Міжнародна науково-практична конференція “Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (MicroCAD–2017, Харків, 2017), II Міжнародна конференція “Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange” (DSMIE-2019, Луцьк, 2019), XXVII Міжнародна науково-практична конференція “Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (MicroCAD–2019, Харків, 2019), IX Міжнародна науково-технічна

конференція “Прогресивні технології в машинобудуванні” (Львів, 2020), III Міжнародна конференція “Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange” (DSMIE-2020, Харків, 2020) VI Міжнародна науково-технічна конференція “Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів” (Луцьк, 2020), VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених (Дніпро, 2020), XXIX Міжнародна науково-практична конференція “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (MicroCAD–2021, Харків, 2021), IV Міжнародна конференція “Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange” (DSMIE-2021, Львів, 2021), 34-та Всеукраїнська конференція “Нові технології в машинобудуванні” (Харків «ХАІ», 2024), Міжнародна конференція “Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems” (SIEMS 2025, Запоріжжя, 2025), VIII Міжнародна конференція “Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange” (DSMIE-2025, Португалія, 2025).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 25 наукових публікаціях, з яких: 8 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, включених до наукометричної бази Scopus та/або Web of Science (із них 2 – у виданнях Q2), 5 статей у наукових фахових виданнях України, та 12 публікацій тез конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 122 сторінки основного тексту, серед них: 43 рисунків, 7 таблиць, 120 найменувань в списках використаних джерел, 11 сторінок додатків. Загальний обсяг роботи викладено на 138 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН, АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ І ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ ЖОРСТКІСТЮ

1.1 Загальні особливості і виклики виготовлення деталей малої жорсткості

В авіаційній, аерокосмічній, енергетичній промисловості застосовується широкий спектр деталей малої жорсткості. Для досягнення високих показників структурної міцності, високої точності геометрії і мікрогеометрії поверхні, деталі малої жорсткості обробляються шляхом видалення великої кількості матеріалу вихідної заготовки. Згідно зі звітом компанії Boeing [1] співвідношення необробленого матеріалу до механічно обробленої деталі може сягати 30:1. Тому, процес розвитку сучасної машинобудівної галузі, у цьому напрямі, визначається високими вимогами підвищення економічної ефективності, продуктивності і точності, що реалізується шляхом упровадження нових засобів підготовки виробництва та використанням сучасних методів автоматизації вирішення інженерних завдань.

З точки зору термінології, у даній роботі використовується відомий у науковому середовищі термін “деталь малої жорсткості”, оскільки основна увага приділяється саме деталям, які мають низьку здатність чинити опір під дією прикладених навантажень, а також, як узагальнене позначення деталей з нерівномірною малою жорсткістю. У галузі також поширений термін “тонкостінна деталь” [2], проте термін описує лише певну геометричну особливість виробу. Враховуючи необхідність вибору оптимальних параметрів механічної обробки для таких деталей, незважаючи на малу товщину, тонкостінна деталь може мати достатню жорсткість, обумовлену кривизною геометрії профілю, малою довжиною вільної частини тощо.

Процес обробки деталей малої жорсткості супроводжується безперервно змінними фізико-механічними характеристиками, що зумовлює динамічні й статичні похибки. З одного боку, при динамічних процесах, істотно

підвищується ймовірність виникнення самозбудних коливань, що прямо впливає на формування мікрогеометрії поверхні, інтенсивність зносу різального інструменту й стану та довговічності окремих вузлів верстата [3]. З іншого боку, у межах статичних процесів віджимна сила, що виникає під час різання, призводить до пружних деформацій заготовки, які негативно позначаються на геометричній точності деталі та можуть викликати вихід її розмірів за межі встановлених полів допусків. У багатьох наукових роботах автори пропонують аналітичні та чисельні моделі для дослідження причин виникнення та методи компенсації статичних [7-11] і динамічних похибок [12-18], спрямовані на підвищення точності та стабільності процесу механічної обробки.

Складність і висока вартість виготовлення деталей малої жорсткості здебільшого виправдовується лише малою вагою і економічною ефективністю вузлів приводів в яких такі деталі використовуються. Тому такі програми, як European H2020 [4] підтримують наукові проєкти за напрямом вдосконалення технології виробництва складнопрофільних деталей малої жорсткості.

Зріст зацікавленості у номенклатурі таких деталей можна оцінити з рисунку 1.1, що відповідає аналітичним даними [5, 6] кількості публікацій в міжнародних індексованих базах даних, включаючи Scopus та Web of Science.

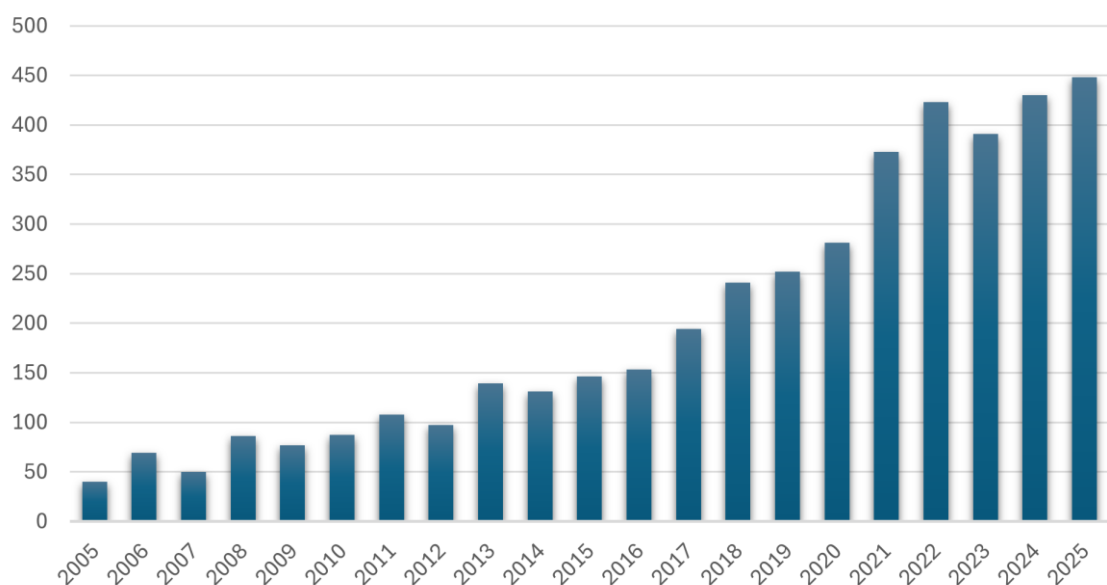


Рисунок 1.1 – Динаміка кількості публікацій за роками щодо “thin-walled parts” в міжнародних індексованих базах даних

1.2 Типи деталей малої жорсткості, методи виготовлення та види деформації

В авіаційній, аерокосмічній, енергетичній промисловості застосовується широка номенклатура деталей малої жорсткості. Залучення сучасних спеціальних технологічних процесів, обладнання та оснащення дає змогу знизити технологічні деформації та вібрації, що є причиною виникнення похибок які можуть входити чи виходити за поля допусків виготовлення.

Допуск виготовлення формується відповідно до типу деталі та ступеню відповідальності у вузлах механізмів. Основні типи деталей з потенційно малою жорсткістю:

- лопатки, крильчатки, імпелери, колеса турбін (рисунок 1.2, а);
- планки різної конструкції великої довжини (рисунок 1.2, б);
- тонкі пластини, плити та диски (рисунок 1.2, в);
- тонкостінні труби, сопла (рисунок 1.2, г);
- вали, стрижні, шпинделі великої довжини (рисунок 1.2, г);
- зубчасті муфти та зубчасті колеса з тонким обідом (рисунок 1.2, д);
- тонкостінні кільця, циліндри, вкладиші, втулки (рисунок 1.2, е);
- корпусні деталі з тонкими стінками та деталі коробчастої форми (рисунок 1.2, є).

За видом, деформації поділяються на деформацію вигину (односпрямована, різноспрямована), кручення, зсуву, розтягування-стиснення. Деформації які зникають після припинення дії навантаження називаються пружні, незворотні залишкові – пластичні.

Методики у дослідженні розроблені на основі деталей лопатевого типу – лопаток турбін, але може бути застосована і до інших деталей малої жорсткості з аналогічними технологічними процесами обробки, за яких виникає мала деформація вигину пружного типу, що підпорядковується закону Гука, тобто пропорційна прикладеному зусиллю, матеріал тіла яких, водночас, розглядається як лінійно пружний.

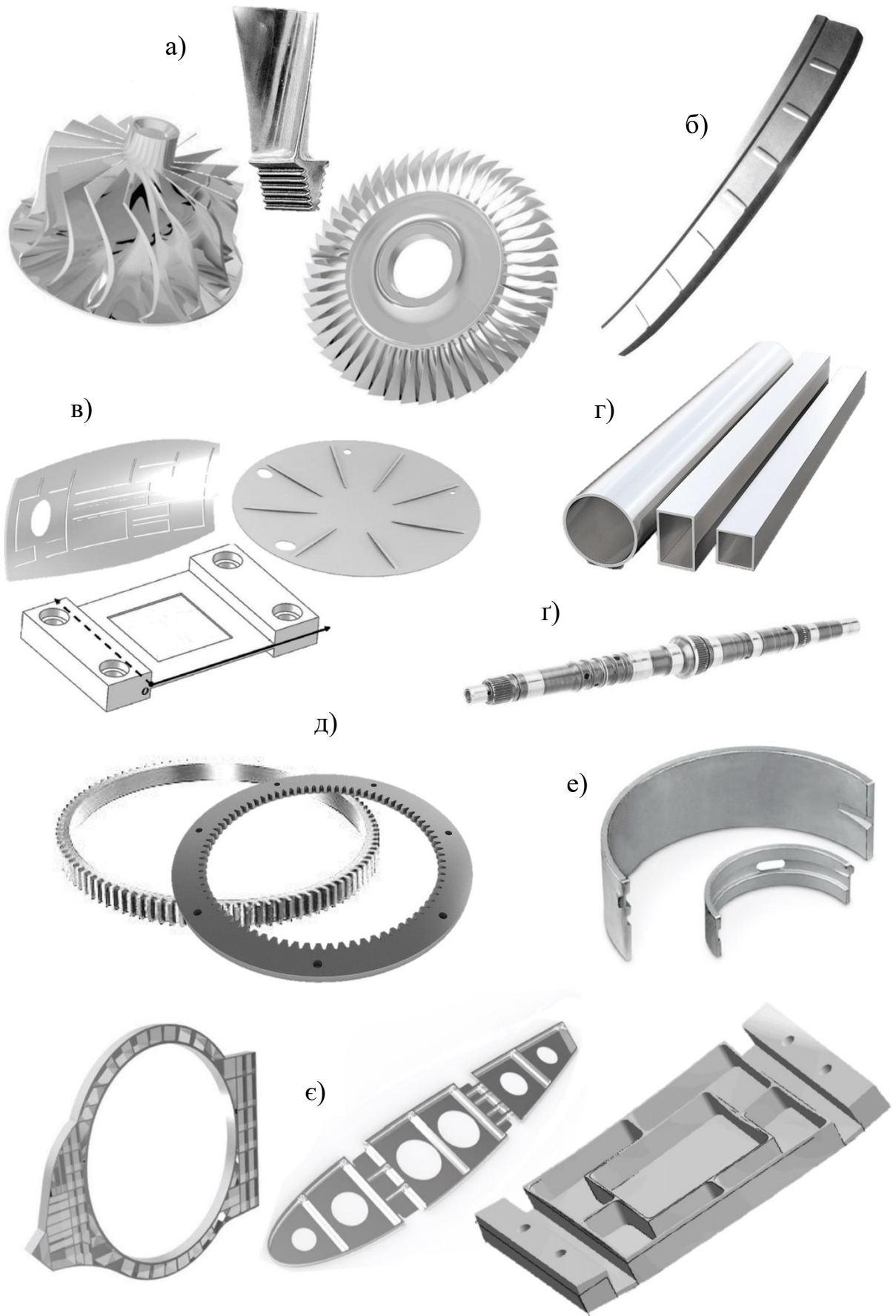


Рисунок 1.2 – Основні типи деталей з потенційно малою жорсткістю

Лопатки сучасних лопатевих машин, в залежності від функціонального призначення та середовища в якому відбувається експлуатація, характеризуються значним конструктивним різноманіттям форм. Еволюція конструкцій лопаток простежується від лопаток середньовічних млинів до високотехнологічних лопаток сучасних турбореактивних двигунів, вітроподвигунів і гідротурбін ГЕС.

Конструкція лопаток безпосередньо залежить від параметрів середовища як в'язкість та густина. В порівнянні з газом, рідина суттєво щільніша, більш в'язка і майже нестислива. Тому в пневматичних і гідравлічних машинах геометрія і розміри лопаток суттєво відрізняються. Через різницю об'єму при однаковому тиску, площа поверхні лопаток пневматичних машин може бути в кілька разів більше лопаток гідравлічних [19]. Відмінності у робочому середовищі впливають не лише на геометрію та конструкцію лопаток, але й на особливості технологічного забезпечення їх виготовлення.

Розроблено та систематизовано класифікацію методів технологічного забезпечення виготовлення деталей малої жорсткості (рисунок 1.3), яка базується на характері впливу на оброблювану деталь. Відповідно до запропонованого підходу всі методи поділено на методи прямого фізичного впливу та методи непрямого впливу, що реалізуються через керування параметрами обробки.

До методів прямого впливу віднесено контактні-механічні, методи на основі технологічних полів, а також струминні методи підтримки, які забезпечують розподілений квазіконтактний вплив на деталь. Методи непрямого впливу включають параметричні методи, засновані на оптимізації режимів різання, а також інструментально-конструктивні рішення.

Проведений аналіз показує, що з точки зору мінімізації деформацій та підвищення стабільності процесу обробки найбільш перспективними є безконтактні методи, зокрема струминні, а також параметричні методи керування режимами різання. Саме ці підходи визначено як пріоритетні для подальших досліджень у даній роботі.

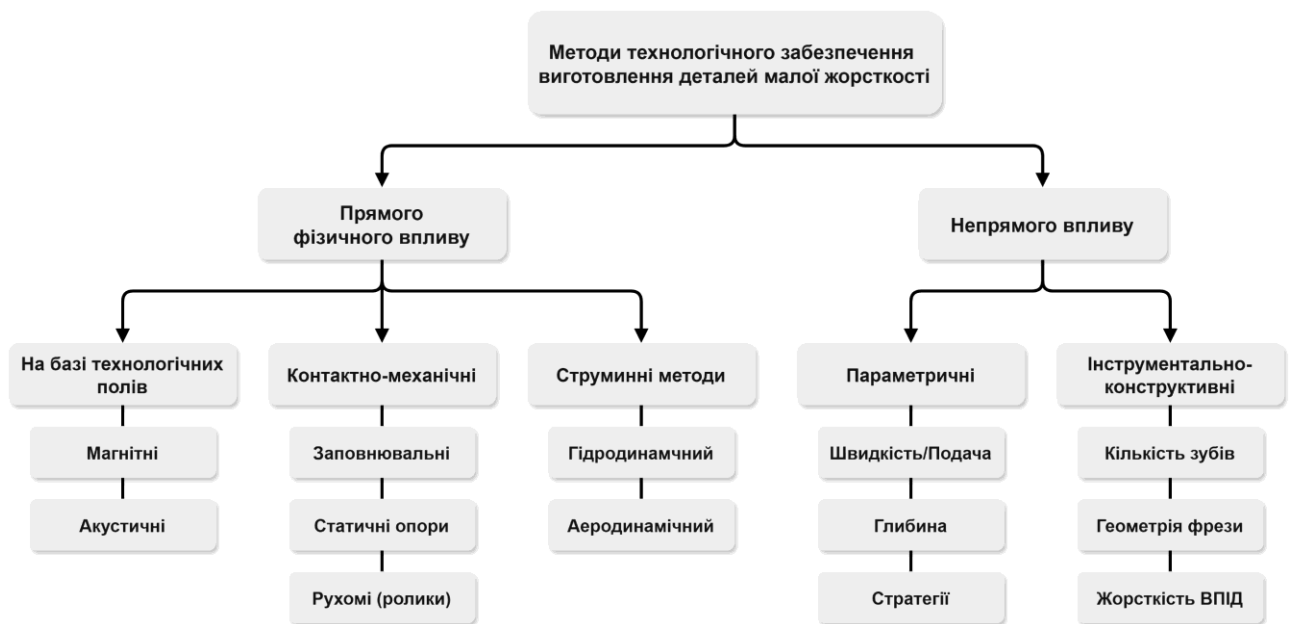


Рисунок 1.3 – Класифікація методів технологічного забезпечення виготовлення деталей малої жорсткості

Деформації деталей малої жорсткості можуть виникати на всіх операціях технологічного процесу, як внаслідок закріплення заготовки, так і в процесі обробки під дією сил різання, змінення геометрії, відповідно, й маси заготовки, вивільнення залишкових напружень матеріалу, вібрацій тощо. Загальний пошук чинників виникнення небажаних деформації може бути проведений із врахуванням регулярності їх прояву, що відображено на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Технологічні деформації за регулярністю прояву

1.3 Визначення конструктивних обмежень, що виникають при виготовленні деталей малої жорсткості

В роботі основна увага приділяється деталям лопатевого типу, технічні вимоги до робочої частини, з огляду на специфіку їх застосування, включають безліч параметрів. Основними є ті, що нормують точність поверхонь, що характеризується точністю профілів перерізів та їх відносним розташуванням по висоті робочої частини. Технічними вимогами встановлюється точність взаємного розташування робочої частини з хвостом, який є базою з'єднання лопаток у складальну одиницю. Гарантовані конструкцією точні за розмірами та розташуванням елементи кріплення повинні забезпечити збирання лопаток у пакети.

Граничні відхилення розмірів, що визначають розташування робочої частини лопаток турбіни щодо хвоста, задаються у трьох напрямках: радіальному, аксіальному (вздовж осі ротора) та тангенціальному. Базами при вимірюванні відхилень у вказаних напрямках є поверхні хвоста, які визначають розташування лопатки після її збирання з диском ротора.

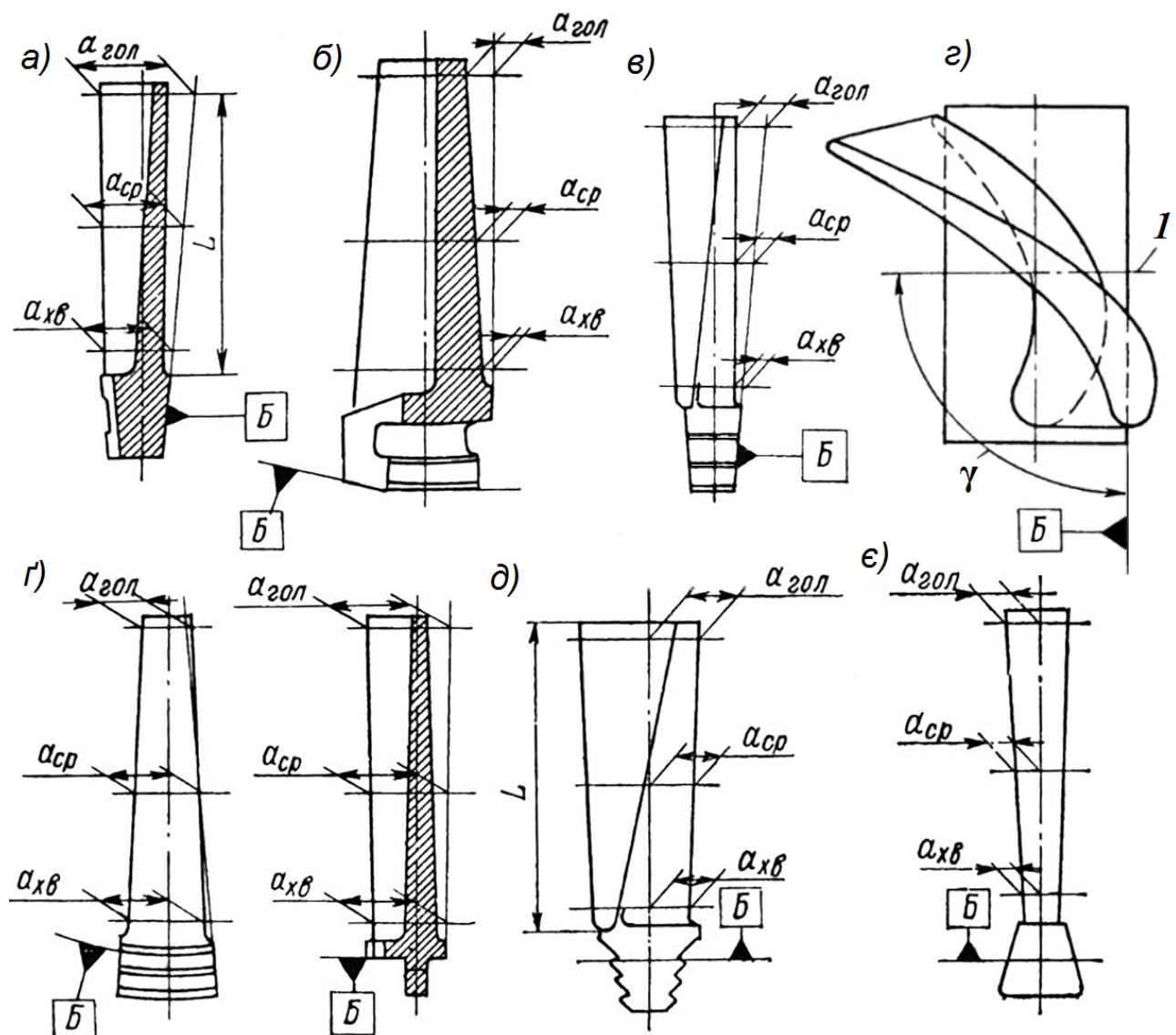
Величини граничних відхилень розмірів, що визначають положення робочої частини лопаток у радіальному напрямку відносно бази, мають забезпечувати задану точність взаємного розташування елементів конструкції турбомашини.

Допустимі відхилення задаються на розміри від нормалі до бази, поєднаної найчастіше з вхідною або вихідною площиною хвоста. Розміри позначаються: $\alpha_{\text{хв}}$ – у першому від хвоста кореневому контрольному перерізі; $\alpha_{\text{гол}}$ – в останньому повному контрольному перерізі; $\alpha_{\text{ср}}$ – у середньому перерізі, що визначається за лінійним законом відносно $\alpha_{\text{хв}}$ і $\alpha_{\text{гол}}$.

Найбільші величини граничних відхилень спостерігаються в тангенціальному напрямку, відповідному обробці зовнішнього або внутрішнього профілю, і розглядається як напрямок мінімальної жорсткості деталі. Підвищена податливість лопатки в цьому напрямку сприяє виникненню пружних деформацій під дією сил різання, що призводить до зниження точності

формоутворення профілю. Способи завдання розмірів, що визначають взаємним розташуванням робочої частини лопаток щодо бази у тангенціальному напрямку наведено на рисунку 1.5.

Чисельні значення граничних відхилень зазначених розмірів у головному та хвостовому перерізах наведено в таблиці 1.1. Граничні відхиленнями розмірів, що визначають положення робочої частини лопатки, відносяться до положення всього профілю перерізу бази Б.



а-г – турбінні робочі, турбінні напрямні, компресорні робочі, компресорні напрямні лопатки радіальної установки відповідно; д-е – турбінні лопатки, компресорні лопатки торцевої установки відповідно.

Рисунок 1.5 – Присвоєння розмірів, що визначають розташування робочої частини лопатки щодо бази в тангенціальному напрямку

Таблиця 1.1 – Граничні відхилення розмірів, що визначають розташування робочої частини лопаток щодо бази в тангенціальному напрямку

Довжина робочої частини, мм	Граничні відхилення розмірів, мм					
	радіальної установки				торцевої установки	
	робочих		напрямних		$\alpha_{\text{ГОЛ}}$	$\alpha_{\text{ХВ}}$
	$\alpha_{\text{ГОЛ}}$	$\alpha_{\text{ХВ}}$	$\alpha_{\text{ГОЛ}}$	$\alpha_{\text{ХВ}}$		
До 100 (включно)	$\pm 0,20$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,30$	$\pm 0,20$
Пон. 100 до 300	$\pm 0,40$		$\pm 0,20$		$\pm 0,50$	
Пон. 300 до 500	$\pm 0,60$	$\pm 0,30$	$\pm 0,30$	$\pm 0,15$	$\pm 0,60$	
Пон. 500 до 700	$\pm 0,80$		$\pm 0,40$		$\pm 0,70$	
Пон. 700 до 900	$\pm 1,20$		$\pm 0,50$		$\pm 1,20$	
Пон. 900 до 1200	$\pm 2,0$		$\pm 0,70$		$\pm 2,0$	
Пон. 1200	$\pm 2,80$		$\pm 0,90$		$\pm 2,80$	

Встановлення розмірів і просторового розташування профілів перерізів робочої частини відносно базової поверхні, що показано на рисунку 1.5, г, є необхідним для визначення конструктивних відхилень. Площина 1 профілів перерізів має певний кут γ з базою хвоста Б, що визначає їх орієнтацію у просторі. Точність завдання розташування профілів перерізів визначається граничними відхиленнями від цього кута. Значення цих відхилень визначається відносно параметрів робочої частини лопаток. Крім того, граничні відхилення кута для хвостових перерізів залежать не лише від геометричних параметрів, а й від кута виходу потоку, що впливає на аерогідродинамічні характеристики елемента. В аксіальному напрямку положення лопаток відносно один одного встановлюється розмірами, що задаються від вхідної хвостової поверхні, забезпечуючи необхідну узгодженість між окремими елементами конструкції.

1.4 Рекомендації щодо зменшення деформацій та напрямки розвитку технології формоутворення деталей малої жорсткості

Відповідно до виду технологічних деформацій, при застосуванні як класичних так і удосконалених технологічних процесів, слід дотримуватися певних рекомендацій:

- застосовувати технологічні процеси з малим навантаженням на пружну систему деталі й за можливості найбільш рівномірного розподілу сили різання (обробка із залученням фрез з профілем що повторює геометрію стінки деталі малої жорсткості, наприклад, конічних для похилих поверхонь, а також застосовувати спіральні фрези, та фрези зі збільшеним числом зубів);
- застосовувати високошвидкісні та високоенергетичні процеси різання, а також враховувати напрям структурної орієнтації матеріалу деталі (за її наявності) під час вибору та планування стратегії обробки;
- обирати такі способи закріплення та розташування в пристосуванні, які у процесі обробки будуть найменшим чином спричиняти відхилення від співвісності базової та оброблюваної поверхонь;
- уникати перезакріплення, відповідно й перебазування заготовки на напівчистових та чистових операціях;
- забезпечувати розсіювання тепла із зони різання. Збільшувати площу контакту опорних елементів пристосування, та застосовувати елементи з високо теплопровідних матеріалів;
- перед чистовою обробкою розраховувати мінімальні припуски, відповідно заготовки повинні мати мінімальну дефектність та шорсткість поверхневого шару.

Передбачити повне видалення похибок шарів за попередніх проходів, при обробці деталей лопатевого типу з двох боків – зовнішнього та внутрішнього профілю, можна враховуючи операційний симетричний припуск на обидві протилежні плоскі поверхні:

$$\Pi_{i \min} = 2 [(Rz + K)_{i-1} + \delta_{\text{виг}} + \delta_i] \quad (1)$$

де Rz – висота мікронерівностей поверхневого шару заготовки;

K – глибина дефектного шару;

$\delta_{\text{виг}}$ – зсув вісі заготовки у розрахунковому перерізі за рахунок вигину;

δ_i – відхилення від співвісності поверхні, обумовлене впливом похибки встановлення, базування та закріплення на попередній та виконуваний операціях.

Міжнародна організація зі стандартизації (англ. International Organization for Standardization, ISO) розробила декілька стандартів, пов'язаних з виробництвом та контролем якості авіаційних компонентів, включаючи тонкостінні деталі, такі як турбінні лопатки та бліски (англ. blisk, контамінація bladed disk). Хоча специфічні стандарти ISO, для конкретних компонентів відсутні, існують різні стандарти ISO, пов'язані з матеріалами, процесами та заходами контролю якості, які стосуються їх виробництва. Стандарти забезпечують відповідність, необхідним вимогам якості та безпеки. Відповідні стандарти ISO визначають:

- ISO 9001: стандарт визначає вимоги системи управління якістю і часто є фундаментальною вимогою для виробників авіаційної техніки, щоб забезпечити постійність відповідності вимогам виробів. В Україні він впроваджений як національний стандарт ДСТУ EN 9100;
- ISO 9100: стандарт, ґрунтується на ISO 9001, специфічний для авіаційної галузі та включає додаткові вимоги, пов'язані з безпекою, надійністю та відповідністю нормативним вимогам;
- ISO 9712: стандарт стосується методів НК (неруйнівного контролю), які є важливими для виявлення дефектів або похибок в тонкостінних авіаційних компонентах;
- ISO 1101: визначає правила задання та оцінювання геометричних допусків форми, орієнтації та розташування поверхонь, що є важливим при контролі профільних поверхонь лопаток турбомашин.

Виробники авіаційної, турбінобудівної галузі часто дотримуються стандартів і рекомендацій, розроблених організаціями, такими як American Society for Testing and Materials (ASTM) або Aviation Industry Association (AIA), що розробляють та публікують широкий спектр стандартів для матеріалів, методів випробувань і технологій виробництва, наприклад, ASTM E2475 надає вказівки для аналізу тонкостінних деталей з використанням електромагнітного контролю. Також застосовуються стандарти розроблені: SAE International (Society of Automotive Engineers) та ANSI (American National Standards Institute).

1.4.1 Спеціальні пристосування додаткової фіксації деталей малої жорсткості

Багато авторів у своїх дослідженнях пропонують спеціальне пристосування, як спосіб демпфування, зниження, чи повного усунення небажаних похибок при обробці деталей малої жорсткості, проте кожна методика має свої особливості і межі застосування.

Використання декількох елементів опори [20] (рисунк 1.6), які розташовані зі зворотного боку, відповідно до лінії обробки та відповідних точок, дозволяє суттєво підвищити точність. Передбачається, що роз'єднання заготовки та елементів кріплення не відбувається під час обробки. Проте, відповідно до типу заготовки, вимог точності, та габаритних розмірів, для кожного випадку необхідний складний алгоритми пошуку локалізації опор та їх оптимальної кількості. Особливо це актуально для деталей малої жорсткості, де навіть незначна зміна положення опор суттєво впливає на характер деформацій і рівень вібрацій. У роботі запропоновано підхід, за якого опорні елементи розміщуються у зонах найбільших коливань заготовки з подальшою оптимізацією їх положення та кількості для забезпечення необхідної точності. Запропонований підхід орієнтований переважно на деталі простої геометрії, тому питання універсальності для складнопрофільних конструкцій залишаються відкритими.

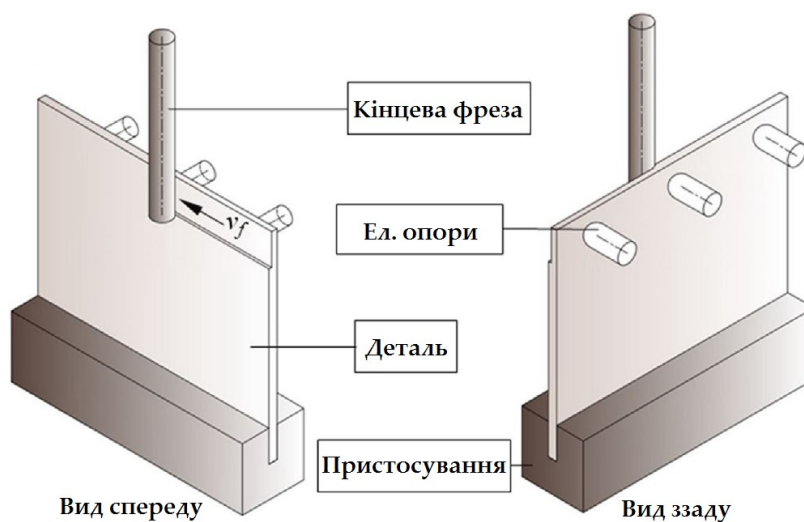


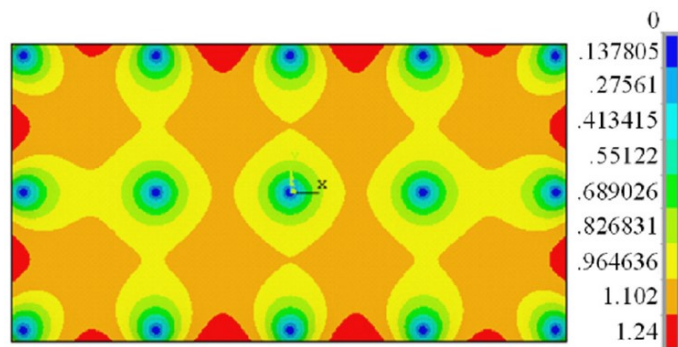
Рисунок 1.6 – Схема застосування елементів опори [20]

У промисловості точкові елементи кріплення представлені також у вигляді вакуумних-адсорбційних систем закріплення [21, 22]. Такі системи застосовуються для вирішення деформаційних проблем у масовому виробництві авіаційної галузі, як наприклад, спеціальне універсальне затискне пристосування (рисунок 1.7, а) [23] від Euro-Tech Corp. Багатоточкова дискретна гнучка опорна технологія характеризується використанням безлічі дискретних опор для підтримки заготовки. Кожен раз, коли відбувається зміна заготовки, пристосування адаптується до геометрії нового компонента зміною положення його опорних та затискних елементів та дозволяє позиціонувати окремі затискні елементи з точністю $\pm 0,005$ мм і з точністю повторення $\pm 0,002$ мм. Виробник зазначає можливість застосування пристосування з відповідною точністю до нестабільних заготовок малої товщини, які складно затискати звичайними методами.

Всупереч надійній фіксації заготовки та точному позиціюванню, такий підхід суттєво збільшує вартість виробництва через складність конструкції пристосування, необхідність використання великої кількості керованих опорних елементів та додаткові витрати на їх налаштування і обслуговування. З точки зору технології, спостерігається виникнення небажаних нерівномірних деформуючих точкових розтяжних напружень (рисунок 1.7, б) [24], що призводить до нерівномірного видалення припуску.



а)



б)

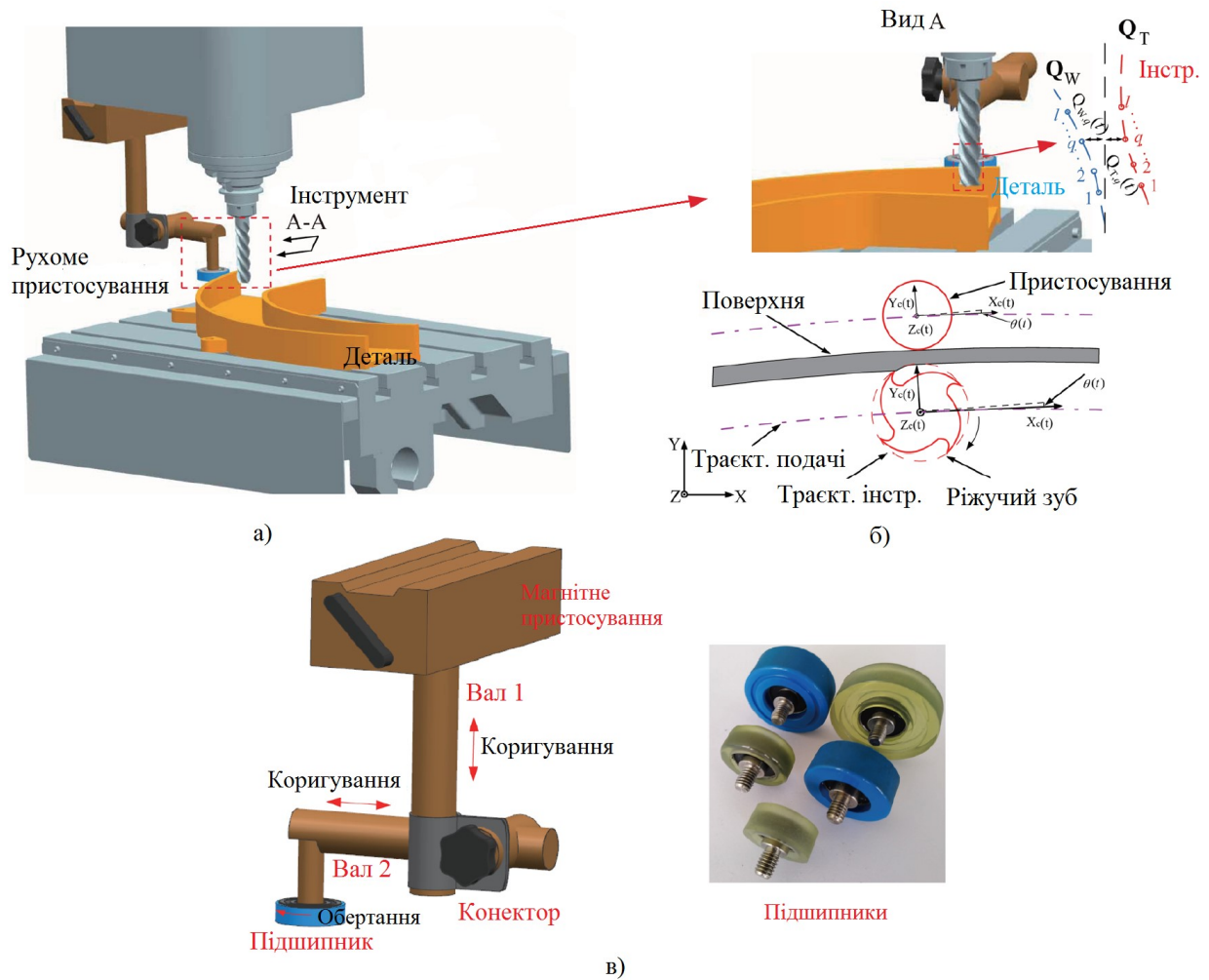
а – універсальне затискне пристосування [23];

б – розтяжні напруження деталі [24].

Рисунок 1.7 – Вакуумно-адсорбційна система закріплення

У роботі щодо пригніченні вібрації у процесі фрезерування [25], представлений метод на основі рухомого пристосування, яке безперервно забезпечує додаткову жорсткість за постійного контакту між спеціальним підшипником, заготовкою та інструментом (рисунок 1.8).

Досліджуються коливання деталей при використанні різних матеріалів контактної поверхні підшипника: гуми, нейлону, поліуретану. Під час переміщення пристосування забезпечується усунення коливань заготовки протягом усього процесу. Теоретична складова моделювання динамічної поведінки заготовки з рухомих пристосуванням ґрунтується на поділі заготовки на три частини: оброблену, оброблювану та ту, що підлягає обробці. Це пояснюється тим, що процес зняття припуску по-різному впливає на динамічну поведінку кожної частини деталі, спричиняючи нерівномірну зміну маси під час обробки, а отже й різний миттєвий динамічний відгук.



а – рухоме пристосування та деталь; б – процес обробки; в – конструкція.
Рисунок 1.8 – Рухоме пристосування обробки маложорстких деталей [25]

Наведений технічний процес дозволяє підвищити стабільність та продуктивність видалення матеріалу деталі, разом з тим, існують й певні обмеження:

- передача окремих відхилень, безпосередньо, самому рухомому пристосуванню в діапазоні 6-10,5 мкм, адже його закріплення відбувається на шпинделі верстата;
- обмеження по висоті оброблюваної деталі. Пристосування має власну пружну систему яку можна розглядати як важіль, зі збільшенням довжини якого, зменшується ефективність супротиву відхиленню;

- необхідність проведення додаткового частотного аналізу, на виникнення резонансних явищ, за кожної суттєвої зміни налаштувань по довжині чи товщині деталі;
- за наведеною схемою можлива обробка деталей лише рівномірної незмінної товщини, в іншому випадку, потребує суттєвого удосконалення.

Однією з прогресивних технологій фіксації є гнучкі оправки для фрезерування деталей малої жорсткості. На початкових етапах чорнової обробки для забезпечення надійного закріплення та уникнення відхилень, лопатки турбін затискають за допомогою спеціальних губок, що мають малу деформацію затискання, або за допомогою спеціальних гідравлічних блоків. Додаткове закріплення заготовки сприяє підвищенню продуктивності обробки та уникненню небажаних відхилень. Удосконалена технологія обробки з розробленими гнучкими оправками для фрезерування деталей малої жорсткості може бути розглянута на комерційному прикладі компанії Innoclamp® [26], що наведено на рисунку 1.9. Затискач стабілізує та мінімізує вібрації завдяки поверхні губок, яка має ефект демпфування, відповідно підвищується динамічна стабільність пружної системи деталі. За допомогою попереднього моделювання визначається оптимальне положення затиску. Вбудовані датчики реєструють поведінку деталі під час обробки. Блок затискної системи встановлюється автоматизовано: дістається із інструментального магазину, як і інший інструмент, розміщується на заготовці, блокується гідравлічним способом охолоджувальною рідиною шпинделя. Після затиску, відбувається відокремлення від тримача інструменту, і блок затискної системи залишається на заготовці. Тримач інструменту повертається в інструментальний магазин, обирається фреза для обробки. Передача інформації з датчиків блоку затискної системи відбувається бездротовим способом, що забезпечує оперативний контроль процесу та можливість своєчасного коригування режимів обробки.



Рисунок 1.9 – Блок затискної системи Innoclamp® [26]

Незважаючи на те, що наведене рішення вже було впроваджено на промисловому рівні, поширення все ще обмежено через високі інвестиційні витрати та необхідність впровадження засобів попередньої підготовки для визначення та проєктування траєкторії руху виконавчих органів для розміщення блоку затискної системи на заготовці, оптимального положення, траєкторії руху інструменту з урахуванням наявності блоку.

Підвищити жорсткість пружної системи деталі можна також за допомогою заповнення міжлопаткового простору пластичним матеріалом. З цією метою компанія Rolls-Roys використовує технологічне середовище RIGIDAX [27] багаторазового використання, проте для збереження початкових властивостей при кожному повторному застосуванні додається 30% свіжого матеріалу. Аналогічна технологія використовується на ДП ЗМКБ «Прогрес» ім. академіка О.Г. Івченка, де середовище не є термопластичним, тож є стійким до зміни температур. Після обробки не підлягає повторному використанню.

Технологія підготовки та заливки середовища АТ «Мотор Січ» (рисунок 1.10) [28], полягає у розплавленні середовища до напіврідкого стану з подальшим її заливанням у міжлопатковий простір на відміну від заповнення простору вручну, що порушувало суцільність контакту середовища з поверхнею деталі.



Рисунок 1.10 – Обробка першого рівня пера лопатки моноколеса ГТД на АТ «Мотор Січ» за ручного заповнення технологічним середовищем міжлопатевого каналу та за технологією заливки [28]

Технологічне середовище застосовується для фінішного фрезерування лопаток моноколів, є термопластичним, тобто при підвищенні температури переходить у високоеластичний і далі у в'язкотекучий стан, що забезпечує можливість його заповнення різними методами. Переходи є оборотними і можуть повторюватися багаторазово, що дозволяє проводити переробку виробничих відходів середовища для повторного застосування. При кімнатній температурі середовище знаходиться у твердому стані. Склад: церезин, олія МС-20, гарматне мастило ПВК. У результатах роботи, у процесі фрезерування, спостерігався відгин інструменту з боку середовища та з наближенням до маточини колеса відбувалося все більше зняття припуску (заріз деталі). У зв'язку з чим для впровадження технології розроблено конструкцію фрези та конструкцію робочої форми для заливання лопаток моноколів поза верстатом. Конструкція передбачає необхідність додаткового нарізання технологічних зубів на конусній і при необхідності циліндричній частини фрези, які мінімально послаблюють жорсткість інструменту але є достатніми для видалення надлишків технологічного середовища, що знаходяться на шляху руху інструменту і відгинають його у бік деталі.

Слід зазначити, що використання додаткових пластичних середовищ призводить до зниження прогнозованості різання з погляду перебігу фізико-механічних процесів. Контакткування технологічного середовища з деталлю може призводити до нестабільних умов обробки, обумовлених зміною коефіцієнта тертя, відведенням тепла із зони різання, та інших факторів, що призводить до зниження якості обробленої поверхні. Підвищується трудомісткість підготовчих та завершальних операцій – процес не обмежується лише механічною обробкою, а потребує операції заповнення: розплавка матеріалу, заливка без утворення каверн і очікування повного затвердіння; видалення: після фрезерування деталей потрібно очистити від заповнювача, і якщо передбачаються додаткові покриття, необхідний високий рівень ретельної очистки від залишків, щоб не нашкодити подальшій адгезії. Може також збільшуватися складність попереднього проектування та отримання УП в САМ системах через необхідність урахування наявності технологічного середовища, в тому числі, з точки зору допоміжних рухів робочих органів верстата. Може знадобитися удосконалення інструменту, збільшується кількість технологічних операцій, відповідно, підготовчий час та вартість готового виробу.

Стрімко набувають поширення адитивні технології виробництва. Для запобігання вібрацій деталей малої жорсткості під час обробки, застосовуються спеціальні опорні конструкції, виготовлені за допомогою адитивного виробництва – 3D-друку (рисунк 1.11). Використовується одна з головних переваг технології, як можливість створювати вироби, що необмежені за складністю форми. Інститут виробничих технологій Фраунгофера та Інститут лазерних технологій Фраунгофера в Аахені пропонують застосування спеціальної опорної конструкції яка може усунути вібрації під час фінішної операції. Опорні металеві конструкції та деталь малої жорсткості виготовлені за технологією селективного лазерного плавлення SLM (Selective Laser Melting) – це процес 3D-друку, у якому використовуються потужні лазери для плавлення та зв'язування тонко подрібненого матеріалу в суцільну структуру. У процесі, принтер наносить рівномірний шар порошку, який потім точно плавиться.

Процес осадження та плавлення повторюється, доки об'єкт не буде сформований. Форма об'єкта створюється шляхом націлювання лазера на шар порошку в певних точках, керуючись CAD файлом деталі. Отримані опорні елементи конструкції підвищують жорсткість критичних зон і зменшують вібрацію при обробці. Елементи видаляються з відносно невеликим зусиллям під час процесу обробки. Деталі, стабілізовані таким чином, можуть бути виготовлені з вищою якістю з точки зору геометричної точності.

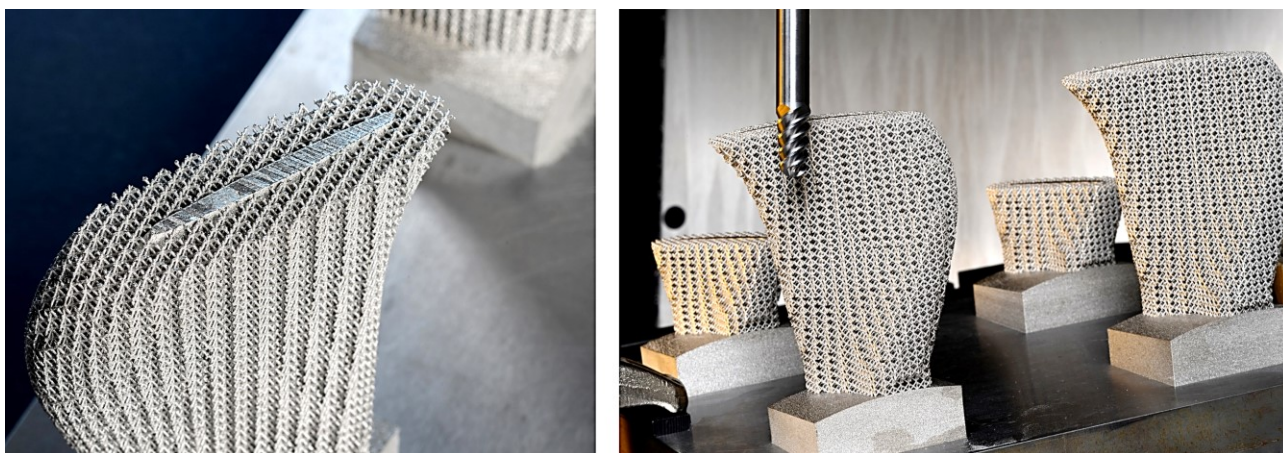


Рисунок 1.11 – Опорні конструкції виготовлені за допомогою 3D-друку для запобігання вібрації у процесі фінішного фрезерування [29]

Разом з тим, рішення має певні обмеження. Окрім збільшеної інтелектуаломісткості етапу проєктування, у процесі фінішного фрезерування, у зонах точкового переходу від однорідного матеріалу деталі в опорні елементи, через нерівномірні навантаження на інструмент можуть виникати додаткові автоколивання. Підтримка передбачається лише для однієї операції, відповідно необхідні специфічні режими різання, що також може бути ускладнено моделюванням програм керування у CAM системах, які не передбачають додаткових підтримуючих шарів навколо деталі чи у між лопатевому просторі коліс турбін. До того ж, опірні конструкції повинні бути враховані за швидких допоміжних рухів органів верстата.

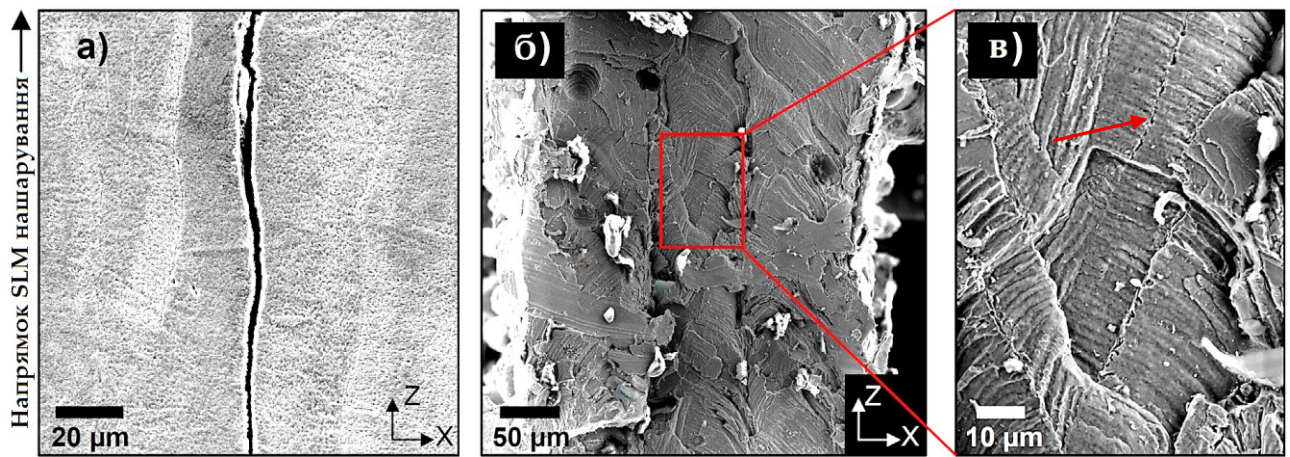
У дослідженнях, крім виготовлення за технологією SLM опірних конструкцій, також розглядають виготовлення тонкостінних деталей загалом за

технологією SLM [30], що з одного боку виключає небажані ефекти за класичної технології формоутворення, проте вносить ефекти іншого характеру. Матеріал багаторазово нагрівається та охолоджується, відбувається постійний пошаровий перехід від порошкового до твердого стану, що призводить до нерівноважного термодинамічного процесу. Лазер з високою енергоємністю плавить шар порошку в плямі променя, у тому числі відбувається теплове розширення і шарів, що раніше затверділи. За рухом плями променя раніше нагріта область починає остигати і стискатися, відбувається усадка матеріалу. Водночас, область усадки обмежена попередньо нанесеними шарами матеріалу, що призводить до виникнення розтяжних залишкових напружень. За циклічного пошарового осадження, напруження безперервно накопичуватимуться всередині деталі.

У такий спосіб утворюється неоднорідна мікроструктура матеріалу з неоднорідною термопластичністю, неоднаковою кривою залежності напруження деформації для різних перерізів деталі. Залишкові напруження за подальшої обробки, чи навіть експлуатації можуть бути вивільнені та призведуть до небажаної деформації, поширення тріщин по межах зерен, зменшуючи площу несучої здатності деталі, чи навіть руйнування, що критично для відповідальних вузлів механізмів загалом, та деталей малої жорсткості зокрема.

На рисунку 1.12 показано скановану електронним мікроскопом типову мікротріщину в поперечному перерізі витравленого тонкостінного зразка, щоб виявити мікроструктуру, виготовленого за технологією SLM у роботі [30]. Дефект спостерігався в 1-му з 3-х зовнішніх стінок зразків та характеризувався тріщинами вздовж напрямку SLM нашарування з окремими тріщинами довжиною до 15 мм і зазвичай до трьох мікротріщин на стінку.

Мікроскопічне зображення на витравленому поперечному перерізі на рисунку 1.12, а відображає міжкристалічну мікротріщину, викликану залишковими напруженнями в конструкції.



а – мікротріщина в поперечному перерізі тонкостінного зразка; б – поверхня всередині тріщини у малому; в – великому збільшенні.

Рисунок 1.12 – Мікроскопічне зображення типової внутрішньої мікротріщини в тонкостінному 3D-надрукованому SLM зразку [30]

Поверхня всередині мікротріщини на рисунку 1.12, б має яскраві включення, які, ймовірно, виступали в якості слабких місць, адже гострі краї включень можуть бути місцями зародження тріщин. Додатковим фактором є те, що зв'язки включень з металом слабші ніж інтерметалеві.

Також, повторне плавлення попередньо нанесених шарів, а також епітаксійне осаджування, призводять до формування довгих стовпчастих зернистих структур, значно орієнтованих уздовж найліпшого напрямку осаджування. Робота про механізми деформації SLM виробів [31] демонструє подібні ефекти.

Слід зазначити, хоч асортимент доступних матеріалів для 3D-друку з металу розширюється але зазвичай обмежується певними металевими сплавами та матеріалами, спеціально оптимізованими для друку. Виготовлення відповідальних металевих деталей малої жорсткості за допомогою адитивних технологій 3D-друку, на відміну від CNC-обробки, поки що не набуло достатнього розповсюдження та якісних показників поверхонь для серійного чи масового виробництва, переважно має високу вартість та посередню продуктивність.

1.4.2 Цифрові системи підготовки виробництва деталей малої жорсткості

Для адаптації до швидкої зміни виробничих циклів і підвищення ефективності, досліджується застосування т. з. цифрових двійників при обробці деталей малої жорсткості. Цифровий двійник визначається як “інтегрована мультифізична, багатомасштабна, імовірнісна симуляція об’єкту або системи, яка використовує найкращі доступні фізичні моделі, оновлення датчиків, історію тощо, щоб відобразити поведінку його реального двійника” [32]. Впровадження подібної копії і постійне оновлення її бази станів, виробничих даних, в результаті інтеграції, стає доступним для додаткового аналізу показників виробництва, та для використання іншими цифровими двійниками деталей. Це дає можливість оператору взаємодіяти як з фізичним виробничим процесом, так і з його цифровою копією в режимі реального часу та гнучко керувати параметрами обробки (рисунок 1.13) [33]. Верстат та цифровий двійник має двосторонній зв’язок з усіма іншими компонентами системи. Цифрова модель отримує інформацію та дані для постійного вдосконалення та підтримки узгодженості з фізичним верстатом. На етапі налаштування цифровий двійник заготовки поставляється з інформацією про тривимірну геометрію, та об’єднує інформацію, включаючи необхідні ріжучі інструменти і необхідні затискні пристосування, інструкції зі встановлення затискних пристосувань, XYZ координати для налаштування положення заготовки. Інтелектуальний НМІ (Human Machine Interface) грає вирішальну роль при об’єднанні технології MR (Mixed Reality) та інтуїтивного представлення наведеної інформації операторам.

Розвиток MR і голографічних технологій робить можливим взаємодію між даними і користувачами наочним і ближчим до сприйняття. Крім того, НМІ не обов’язково повинен бути підключеною панеллю керування машини. Це може бути будь-який дисплей, портативний пристрій або навіть пристрій з головним кріпленням для AR/VR. Різні підходи до реалізації НМІ дають більш зручні можливості в різних робочих середовищах.

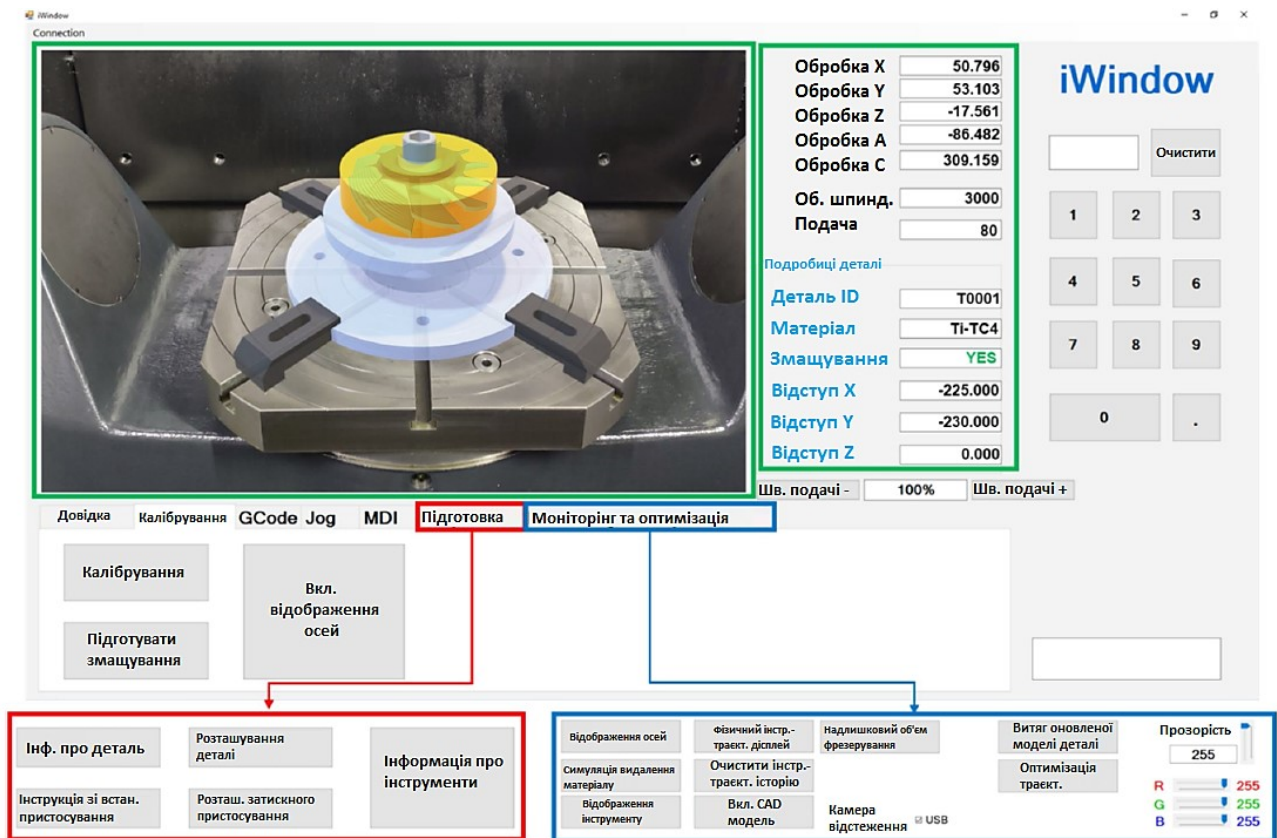


Рисунок 1.13 – НМІ цифрового двійника деталі [33]

В роботах [33-35] розглядається оптимізація траєкторії та вибір найкращої орієнтації інструмента з безлічі альтернативних варіантів. Розраховується сила різання для кожної альтернативної орієнтації і відбувається завантаження в конкретний вузол скінченної сітки деталі. Наступним кроком відбувається витяг деформації вузлів з САЕ програми. Виконується вибір орієнтації інструмента, що відповідає мінімальній деформації, як найбільш оптимальній. Відбувається завантаження даних та оптимізованої траєкторії в систему роботи з цифровим двійником деталі.

Спираючись на аналіз, можна сформулювати наступні переваги впровадження цифрових двійників у виробництві деталей малої жорсткості:

– цифровий двійник дозволяє моделювати й аналізувати виробничий процес, оптимізувати конструкцію і виявляти потенційні проблеми до того, як вони виникнуть у реальності. Цифровий двійник можна використовувати для розрахунку максимально допустимої сили різання, визначення оптимальних опорних конструкцій, та їх розташування, щоб запобігти відхиленням.

Відповідно, й для розрахунку власних частот і мод коливань, та оптимізації процесу обробки для запобігання резонансних вібрацій, що може підвищити точність і якість кінцевої поверхні, та продовжити термін служби деталі;

– цифрові двійники можуть бути спільно оброблені кількома користувачами, що забезпечує кращу співпрацю у прийнятті рішень. Концептуальна відмінність від простої мережевої файлової системи зберігання інформації, полягає у тому, що інтерфейс взаємодії з цифровим двійником поєднує усі бази даних станів деталі, із мінімізацією явного залучення сторонніх програм, у тому числі розрахункових, комунікація з якими може відбуватися у неявний спосіб, наприклад, REST API запитами;

– можливість попередньої симуляції процесу допомагає зменшити відходи та оптимізувати ресурси, підвищити економічну ефективність;

– цифровий двійник можна використовувати для оптимізації траєкторії руху інструменту, скорочуючи часи циклів, та збільшуючи відповідні періоди стійкості.

З точки зору недоліків такої технологічної підготовки можна відзначити:

– високі витрати на впровадження, оскільки потребує спеціалізованого програмного та апаратного забезпечення, а також кваліфікованого персоналу;

– цифровий двійник – це цифрове представлення фізичних активів і виробничих процесів, які можуть бути вразливими до витоку даних;

– використання цифрового двійника передбачає аналіз даних і моделювання, що може вимагати спеціальних навичок і знань;

– інтеграція цифрового двійника з існуючими виробничими системами та процесами може бути складною і тривалою;

– цифровий двійник і програмний інтерфейс потребує постійного обслуговування та оновлень, щоб забезпечити його точність і актуальність.

Сучасні спеціальні оснащення додаткової фіксації деталей малої жорсткості та засоби оптимізації прийняття рішень, мають як переваги у перспективі їх розвитку так і технологічні недоліки та/або високі інвестиційні витрати.

Висновки за розділом 1

За результатами проведеного у розділі комплексного аналізу встановлено:

- типи деталей, види деформацій, методи технологічного забезпечення;
- конструктивні обмеження, граничні відхилення розмірів лопаток;
- загальні рекомендації щодо зменшення деформацій у процесі обробки;
- переваги й недоліки засобів фіксації деталей малої жорсткості.

Існуючі засоби підвищення точності обробки деталей малої жорсткості характеризуються обмеженою універсальністю, адаптивністю до нерівномірної жорсткості або значними витратами. Водночас розвиток цифрових технологій створює передумови для підтримки прийняття рішень під час підготовки технологічних операцій. Тому перспективними напрямками є запропонований метод адаптивної гідродинамічної підтримки для зменшення пружних відхилень та розроблення програмного інструменту для прогнозування похибок і вибору раціональних параметрів. Відповідно, сформульовано наступні задачі:

- врахувати аналіз методів технологічного забезпечення фрезерування деталей малої жорсткості;
- удосконалити класичний технологічний процес механічної обробки деталей малої жорсткості шляхом оптимізації технологічних параметрів та застосування допоміжного технологічного забезпечення;
- побудувати необхідні адекватні математичні моделі відхилення зразка малої жорсткості у процесі фрезерної обробки;
- виконати порівняння результатів на основі розрахункових побудованих моделей із моделями скінченно-елементного аналізу;
- узагальнити методику та розробити рекомендаційну систему попереднього обирання технологічних параметрів з метою прогнозування небажаних відхилень.

Зміст розділу відображено у таких наукових публікаціях: причини виникнення та методи компенсації статичних похибок [7, 8] та динамічних похибок [12] у процесі механічної обробки.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ ЖОРСТКІСТЮ

2.1 Модель статичної складової відхилення деталі малої жорсткості

Складна поверхня деталей лопатевого типу характеризується низкою параметрів геометрії профілів окремих перерізів. Профіль пера лопатки впливає, як на динамічні характеристики проточної частини загалом, так і на власну несучу здатність, опору втомі за циклічного навантаження. У разі невідповідності технічним вимогам ймовірність виникнення резонансних напружень лопаток є причиною асиметрії та коливань робочих коліс. Тому, важливо проаналізувати механізм виникнення похибок з метою подальшого прогнозування геометричної точності.

У процесі фрезерної обробки деталей з нерівномірною малою жорсткістю, небажані відхилення виникають в напрямку мінімальної жорсткості їх пружної системи. Відповідно до силових показників процесу обробки, це може призводити до недотримання технологічних вимог, оскільки величина відхилень перевищує величини допуску на операційний припуск. Відбувається накопичення похибок, що призводить до виходу за межі остаточного допуску деталі після виконання останньої операції. Невідповідність до технічних вимог пов'язана зі зниженням продуктивності процесу механічної обробки, оскільки частина енергії різання витрачається на пружну деформацію вільної частини деталі малої жорсткості, що є відмінною рисою, на противагу обробці абсолютно жорстких деталей.

В умовах дослідження, аналіз майбутньої геометрії робочої лопатки, може бути виконано спираючись на результати верифікації поведінки дослідного зразку деталі малої жорсткості.

Модель для попереднього розрахунку статичної складової відхилення дослідного зразка деталі нерівномірної жорсткості показано на рисунку 2.1 і

розглядається для найбільш критичного випадку, коли виникають максимальні відхилення за силового впливу прикладеного до кінця вільної частини. Водночас модель дає змогу визначати відхилення у будь-якій точці, розбиваючи вільну частину на ділянки інтегрування.

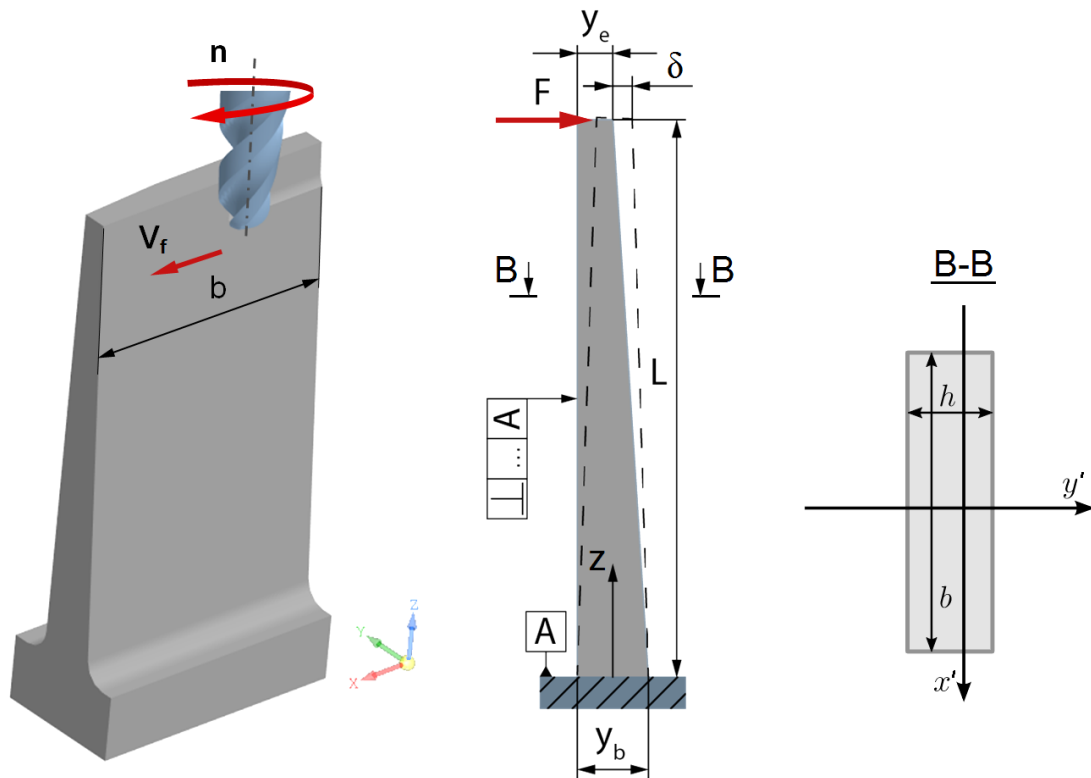


Рисунок 2.1 – Модель статичної складової відхилення зразка деталі з нерівномірною малою жорсткістю

Теоретичним базовим принципом для формального вираження моделі відхилення слугує друга теорема Кастільяно, тлумачення якої полягає у методі визначення зсувів лінійно-пружної системи на основі часткових похідних енергії. Відомо, що зміна енергії дорівнює добутку сили, що викликала зміну на результуюче переміщення точки. Відповідно, діюча сила, дорівнює зміні енергії, поділеній на результуюче переміщення точки. Результуюче переміщення точки дорівнює зміні енергії, поділеній на діючу силу. Часткові похідні необхідні для того, щоб встановити зв'язок між діючими силами і результуючими переміщеннями через зміну енергії системи. Цей підхід лежить

в основі практичного застосування теореми під час аналізу пружних конструкцій.

Отже, друга теорема свідчить, що переміщення δ точки у напрямку дії прикладеної сили F , дорівнює частковій похідній узагальненої потенційної енергії деформації конструкції по відношенню до цієї сили:

$$\delta = \frac{\partial U_C}{\partial F}, \quad (2.1)$$

де U_C – узагальнена потенційна енергія деформації вигину:

$$U_C = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dz. \quad (2.2)$$

Модуль Юнга E – міра жорсткості матеріалу [36]. Внутрішній момент вигину в точці на відстані z від основи – $M = F \cdot z$. Переріз зразка є прямокутником R , з шириною b і висотою h , та площею A . Висота h відповідає товщині зразка у визначеному перерізі. Центр розташований відповідно до початку координат зразка. I представляє момент інерції плоского перерізу відносно осі x' :

$$I = \iint_R y'^2 dA = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-h/2}^{h/2} y'^2 dy' dx' = \int_{-b/2}^{b/2} \frac{1}{3} \frac{h^3}{4} = \frac{bh^3}{12}, \quad (2.3)$$

наводячи h , з урахуванням змінної товщини зразка уздовж z :

$$I = \frac{b \cdot (y_e + \alpha z)^3}{12}, \quad (2.4)$$

де b – ширина пружної конструкції;

α – міра збільшення товщини, що визначається як:

$$\alpha = \frac{y_b - y_e}{L}. \quad (2.5)$$

Об'єднуючи вирази в узагальнену енергію деформації вигину (2.2):

$$U_c = \frac{6F^2}{Eb} \int_0^L \frac{z^2}{(y_e + \alpha z)^3} dz. \quad (2.6)$$

Об'єднуючи вирази в рівняння (2.1), відхилення кінця зразка деталі з нерівномірною малою жорсткістю у довільній точці довжини L :

$$\delta(z) = \frac{\partial U_c}{\partial F} = \frac{F}{E} \int_0^z \frac{z^2}{I} dz = \frac{12F}{Eb} \int_0^z \frac{z^2}{(y_e + \alpha z)^3} dz. \quad (2.7)$$

Механічна жорсткість – це здатність твердого тіла, конструкції чи її елементів чинити опір деформації. Оцінити механічну жорсткість зразка можливо коефіцієнтом жорсткості:

$$k = \frac{\partial F}{\partial \delta} = \frac{E}{\int_0^L \frac{z^2}{I} dz} = \frac{E \cdot b}{12 \int_0^L \frac{z^2}{(y_e + \alpha z)^3} dz}. \quad (2.8)$$

Механічне напруження – це міра інтенсивності внутрішніх сил, що виникають у здеформованому тілі під впливом діючих факторів. Оцінити максимальне механічне напруження зразка біля основи можливо за формулою:

$$\sigma_{\max_stress} = \frac{6F \cdot L}{b \cdot y_b^2}. \quad (2.9)$$

2.2 Визначення компонентів сили різання при бічному фрезеруванні деталей малої жорсткості

Сили різання є одними з основних характеристик процесу різання, та враховуються при розрахунках на міцність пристосувань і ріжучих інструментів. Показники й закономірності зміни сил різання визначають необхідну потужність металорізальних верстатів. Керування показниками дає змогу вирішувати питання точності і якості обробки, враховувати деформацію інструменту і деталі, а також впливати на процеси збурення та згасання вібрацій.

Сили різання, у процесі обробки, можуть спричиняти значне напруження в деталях малої жорсткості, що веде до похибок розмірів, дефектів поверхонь та навіть втрати стабільності процесу різання. Точна модель розрахунку сил дає змогу оптимізувати параметри обробки, як швидкість різання, швидкість подачі, глибину різання та інші, з метою зменшення навантаження на деталь та мінімізації ризику її пошкодження.

Сили різання залежать від кількох факторів, включаючи геометрію та матеріал різального інструменту, параметри обробки, такі як швидкість різання, подача та глибина, та властивості матеріалу заготовки, такі як твердість, пластичність, міцність.

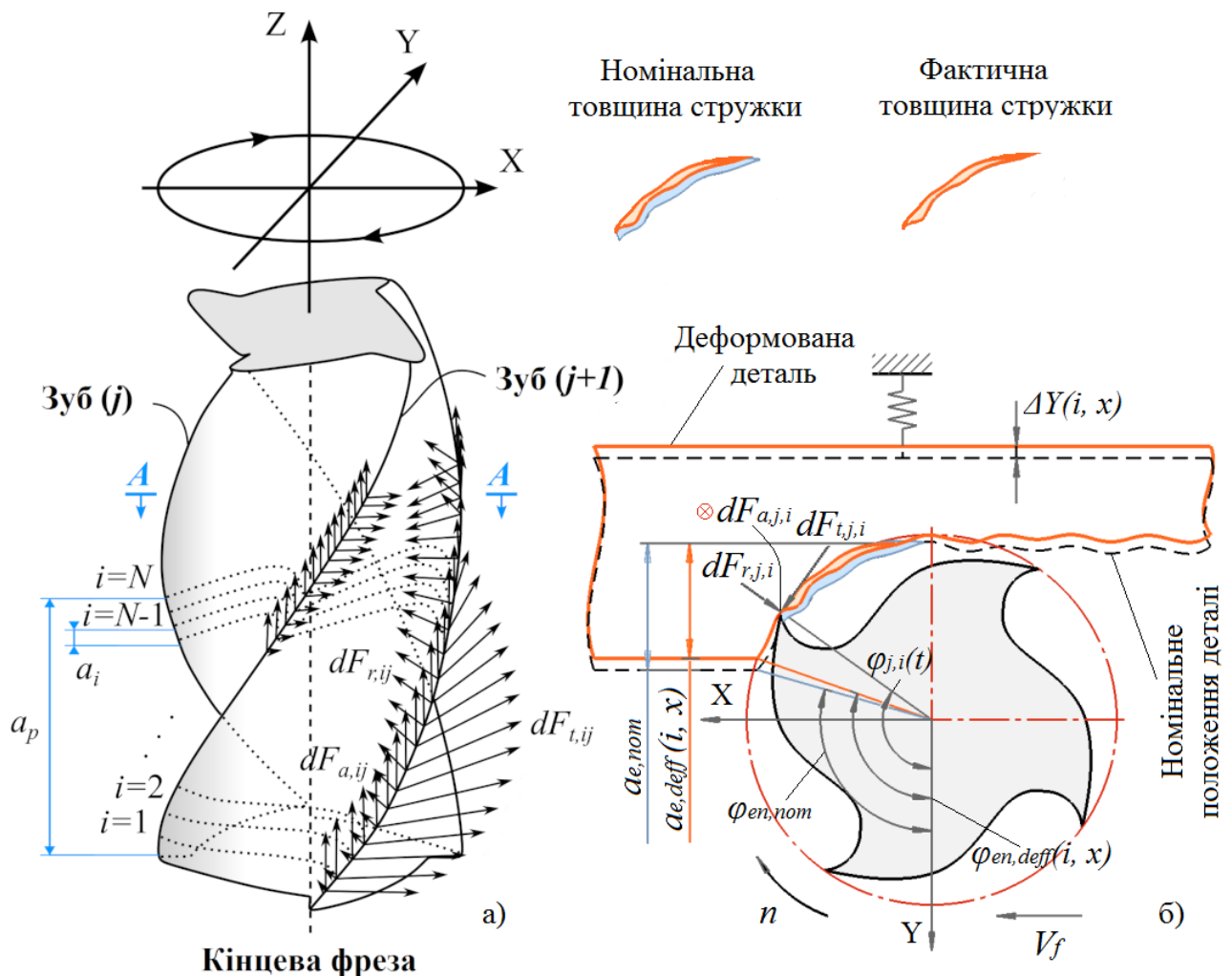


Рисунок 2.2 – Модель сил різання деталі з нерівномірною малою жорсткістю

Для розрахунку сили різання у процесі бічного фрезерування, спіральна фреза та деталь, поділяються на кінцеву кількість ділянок інтегрування i – своєрідних плоских елементів (рисунок 2.2). Зміни меж занурення на певній осевій висоті через силовий деформаційний вплив врізання, представлені різними кутами входу, тобто занурення $\varphi_{en,nom}$ – за номінального, якби деталь мала абсолютну жорсткість та $\varphi_{en,deff(i, x)}$ – за деформованого положення, що моделюється в зонах контакту інструмент-деталь. Відповідно, $a_{e,nom}$, $a_{e,deff}(i, x)$ – глибини різання.

Сила різання деталі малої жорсткості на j -й ріжучій поверхні i -ї ділянки складається зі статичного і динамічного компонента і може бути виражена як:

$$F_i(t) = \sum_{j=1}^{N_j} (F_{s,j,i}(t) + F_{d,j,i}(t)) \quad (2.10)$$

Для визначення величин відхилення деталі малої жорсткості під час обробки, необхідним є оцінювання не тільки сумарної сили різання, а і її складових, тому що певні складові сили різання безпосередньо впливають на пружну деформацію деталей малої жорсткості в процесі обробки.

Згідно класичної кругової моделі траєкторії руху ріжучої кромки фрези [37], заснованої на матриці повороту в тривимірному просторі, для j -ї ріжучої поверхні i -ї ділянки миттєві компоненти сили різання для статичної чи динамічної характеристики процесу у загальному вигляді можуть бути записані у наступний спосіб:

$$F_{j,i}(t) = \begin{bmatrix} F_{x,j,i}(t) \\ F_{y,j,i}(t) \\ F_{z,j,i}(t) \end{bmatrix} = g_{j,i}(t) \cdot \begin{bmatrix} -\cos \varphi_{j,i}(t) & -\sin \varphi_{j,i}(t) & 0 \\ \sin \varphi_{j,i}(t) & -\cos \varphi_{j,i}(t) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{t,j,i}(t) \\ F_{r,j,i}(t) \\ F_{a,j,i}(t) \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

де $\varphi_{j,i}(t) = (2\pi n/60)t - i - (j-1)(2\pi/N_j)$ – кут занурення в оброблюваний матеріал j -ї ріжучої поверхні i -ї ділянки;

n – частота обертів фрези;

$g(\varphi_j, i)$ – функція для визначення того, чи знаходиться j -ї ріжуча поверхня i -ї ділянки у процесі різання:

$$g(\varphi_{j,i}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \varphi_{en,deff}(i, x) \leq \varphi_{j,i} \leq \varphi_{ex,deff}(i, x) \\ 0 & \text{в іншому випадку} \end{cases}, \quad (2.12)$$

де $\varphi_{en,deff}(i, x)$, $\varphi_{ex,deff}(i, x)$ – кути входу та виходу різучої кромки фрези, що складають межу зони контакту інструменту-деталі i -ї ділянки за подачі на позиції x ;

$F_{t,j,i}(t)$, $F_{r,j,i}(t)$, $F_{a,j,i}(t)$ – сили, що діють у тангенціальному, радіальному, та осьовому напрямках на j -й ріжучій поверхні i -ї ділянки на час t :

$$\begin{bmatrix} F_{t,j,i}(t) \\ F_{r,j,i}(t) \\ F_{a,j,i}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tc} \\ K_{rc} \\ K_{ac} \end{bmatrix} (h_{s,j,i}(t) + h_{d,j,i}(t)) dz + \begin{bmatrix} K_{te} \\ K_{re} \\ K_{ae} \end{bmatrix} dz, \quad (2.13)$$

де K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} – коефіцієнти, зумовлені процесом різання в тангенціальному, радіальному та осьовому напрямках;

K_{te} , K_{re} , K_{ae} – коефіцієнти, зумовлені ріжучою кромкою;

$h_{s,j,i}(t) = f_z \sin \varphi_{j,i}(t)$ – статична миттєва товщина не зрізаної стружки для j -ї ріжучої поверхні i -ї ділянки;

f_z – подача на зуб;

$h_{d,j,i}(t) = (x_{j,i}(t) - x_{j,i}(t - T)) \cdot \sin \varphi_{j,i}(t) + (y_{j,i}(t) - y_{j,i}(t - T)) \cdot \cos \varphi_{j,i}(t) - (z_{j,i}(t) - z_{j,i}(t - T))$ – динамічна миттєва товщина не зрізаної стружки для j -ї ріжучої поверхні i -ї ділянки, визначається сукупною поведінкою за регенеративних коливань деталі, різниці положення деталі в системі координат на поточний час t та за один період T , що передував проходженню зуба.

Силовий вплив на деталь малої жорсткості під час різання неминуче призводить до реакції пружної системи. Як наслідок, це призводить до відхилення фактичної радіальної глибини різання $a_{e,deff}(i, x)$ від її номінального значення $a_{e,nom}$ (рисунок 2.2, б). В результаті фактичний кут врізання $\varphi_{en,deff}(i, x)$ також відрізняється від номінального значення $\varphi_{en,nom}$. До того ж, відхилення

змінюються не лише за напрямком мінімальної жорсткості деталі, а й за напрямком подачі. Таким чином, фактична радіальна глибина різання та межі кута врізання різні для кожного положення висоти контактної ділянки i для кожного положення подачі x . Враховуючи, що виконується процес попутного фрезерування, фактична радіальна глибина різання $a_{e,deff}(i, x)$ та результуючий фактичний кут занурення кромки фрези $\varphi_{en,deff}(i, x)$ з діаметром D :

$$a_{e,deff}(i, x) = a_{e,nom} - \Delta Y(i, x), \quad (2.14)$$

де $\Delta Y(i, x)$ – фактичне відхилення деталі малої жорсткості;

$$\varphi_{en,deff}(i, x) = \pi - \arccos\left(1 - \frac{2a_{e,deff}(i, x)}{D}\right). \quad (2.15)$$

Якщо прийняти нульовий радіус кромки та нульовий кут в плані, осьові компоненти сил різання стають нульовими також ($F_a = 0$), відповідно й коефіцієнти, зумовлені ріжучою кромкою. Коефіцієнти різання іноді виражаються як нелінійна функція миттєвої чи середньої товщини стружки. Коефіцієнти різання передбачаються постійними для пари інструмент-оброблюваний матеріал, і вони можуть бути отримані або механічно з випробувань, або з використанням класичних перетворень формул для косокутного різання [38]:

$$\left. \begin{aligned} K_{tc} &= \frac{\tau_s}{\sin \varphi_n} \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) + \tan i \tan \eta \sin \beta_n}{\sqrt{\cos^2(\varphi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta \sin^2 \beta_n}}, \\ K_{rc} &= \frac{\tau_s}{\sin \varphi_n} \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) \tan i - \tan \eta \sin \beta_n}{\sqrt{\cos^2(\varphi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta \sin^2 \beta_n}}, \\ K_{ac} &= \frac{\tau_s}{\sin \varphi_n \cos i} \frac{\sin(\beta_n - \alpha_n)}{\sqrt{\cos^2(\varphi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta \sin^2 \beta_n}}. \end{aligned} \right\}, \quad (2.16)$$

де τ_s – теоретична границя міцності на зсув, що залежить від границі міцності матеріалу (для сталі – $0,75 \cdot \sigma_B$), чи береться з ортогональних тестів;

φ_n – нормальний передній кут зсуву стружки, припущено рівним куту зсуву стружки (φ_c) за косокутного різання;

$\beta_n = \text{atan}(\tan(\beta_a) \cdot \cos(\eta))$ – коефіцієнт тертя β_a та кут руху стружки ($\eta = i$), який припущено рівним куту різання i , який припущено рівним куту спіралі фрези;

α_n – нормальний передній кут ріжучого зуба фрези.

У фрезеруванні кут занурення $\varphi_{en, def}(i, x)$ (2.15) вказує на кут, під яким ріжучий інструмент входить у заготовку під час процесу різання. Кут занурення може значно впливати на якість та точність готової деталі, особливо при фрезеруванні деталей малої жорсткості. Важливо враховувати кут занурення, щоб зменшити ризик деформації або пошкодження деталі. Це пов'язано з тим, що деталі малої жорсткості більш схильні до деформації та вібрацій під час обробки, і неправильно обраний кут занурення може погіршити ці небажані явища.

Зазвичай при фрезеруванні деталей малої жорсткості обирають менший кут занурення, щоб зменшити силу, що впливає на деталь та зменшити ризик деформації. Однак розрахований специфічний кут занурення, що є оптимальним, і залежить від факторів, як матеріал заготовки, геометрія деталі та параметри різання, дає змогу отримати поверхні вищої якості, зменшуючи ризик дефектів як поверхні, так і псування інструменту.

Один з підходів до визначення оптимального кута занурення для фрезерування деталей малої жорсткості, є використання адаптивного програмного рішення для моделювання процесу обробки та оцінки впливу різних кутів на якість та точність деталі [39-45]. Підхід допомагає визначити оптимальний кут занурення, зменшуючи ризик деформації.

Проте, адаптивне керування кутом занурення, у разі деталей малої жорсткості, спричиняє або додаткову депланацію форми або збільшення числа проходів для зняття припуску. Тобто, якщо суттєво підвищувати кут занурення, з метою компенсації падіння ефективності різання деталі малої жорсткості (недоріз), може проявлятися небажаний ефект у вигляді зайвого нерівномірного

відхилення деталі у процесі різання, відповідно й нерівномірного зняття припуску (рисунок 2.3).

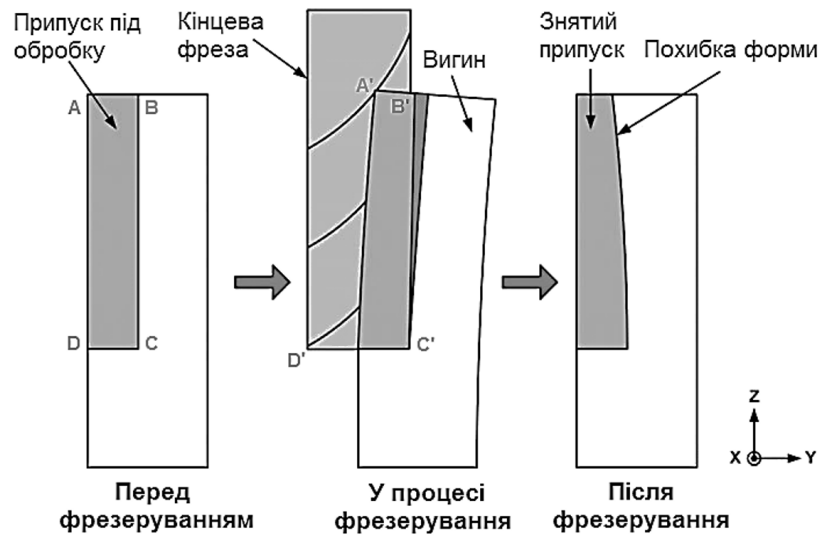


Рисунок 2.3 – Відхилення деталі від заданої номінальної форми

Якщо виконувати адаптацію до вимог точності шляхом зменшення кута занурення, зменшується сила дії на ПС деталі, відповідно й похибка, проте результуючий припуск на обробку може бути замалим і постає необхідність у додаткових проходах для зняття припуску.

Кут занурення є важливим параметром при фрезеруванні деталей малої жорсткості, і потрібно ретельно контролювати оптимальний кут на основі конкретних вимог до операції обробки. Проте, для досягнення найвищих показників геометричної точності, за адаптивного керування, у роботі наводиться компенсація небажаних ефектів обумовлених ПС деталі, засобами допоміжного гідродинамічного обтікання. У процесі обробки максимально підтримується геометрична сталість деталі малої жорсткості без необхідності знижувати параметричні показники продуктивності процесу фрезерування.

2.3 Засоби адаптивної обробки деталей малої жорсткості

При обробці деталей малої жорсткості сили та напруження є основними факторами відхилення деталі, що можуть значно зменшити продуктивність обробки, впливаючи як на геометричну точність, так і на шорсткість поверхні.

Відхилення деталі може мати різноманітні небажані наслідки для процесу механічної обробки, зокрема призвести до втрати точності, відповідно, виходу за межі допусків отриманих розмірів деталі. Через небажані відхилення відбувається врізання не в номінальному положенні, це призводить до ускладнення визначення закономірностей формування поверхонь деталі. Зазначене особливо критично при обробці деталей із вузькими межами допусків.

З точки зору якості поверхні, формоутворення відбувається за різних ступенів відхилення протягом процесу різання, тобто видаляється різний обсяг матеріалу, що призводить до змінного характеру шорсткості поверхні.

Деталь з низькою жорсткістю, більш схильна до вібрацій, які можуть призвести до поломки або зносу інструменту [46]. Фреза зазнає раптових навантажень, що призводить до збільшення напружень і виходу з ладу. Крім того, оскільки інструмент стикається зі змінами у шорсткості поверхні, може відбуватися збільшення зносу, зменшуючи його термін служби і подальше впливаючи на продуктивність обробки. Оскільки жорсткість деталі змінюється вздовж лінії обробки, власні частоти деталі також можуть змінюватися, що робить її більш схильною до резонансу, особливо коли сили різання також мають змінний характер.

Технологічні процеси обробки часто ґрунтуються на стабільних умовах різання для забезпечення якості та ефективності. В той час як змінна жорсткість може ускладнити збереження стабільних умов різання, що призводить до необхідності зменшення можливих швидкостей та подач або застосування стратегій адаптивної обробки.

Адаптивна обробка може бути впроваджена у вигляді вимірювання у реальному часі, але для цього необхідні високотехнологічні сенсори та обробка сигналів, апаратне забезпечення для вимірювань, інтеграція програм, інтеграція САМ, збільшення часу циклу для включення вимірювальних операцій. Попередня адаптація технології виробництва для врахування міждетальних варіацій дає змогу забезпечити більш послідовне та стабільне формування

складної геометрії. За наявності надійного обладнання, якісного технологічного оснащення, стабільних характеристик матеріалів процес механічної обробки може виконуватися з мінімальним втручанням оператора. Однак важливо забезпечувати цей рівень стабільності постійно. Варіації властивостей матеріалів від деталі до деталі можуть призводити до нестабільного технологічного навантаження, яке складно повністю компенсувати.

Комбінація використання технології адаптивної обробки, такої як попередньої розробки на основі даних, та розробленої технології фіксації деталі сприяє стабілізації деталі під час обробки, зменшуючи небажаний вплив її змінної жорсткості.

З аналізу літератури було виявлено, що багато досліджень присвячено адаптивним механізмам керування обробкою, які впливають на режими різання або величини припуску, що знімається.

Підхід до прогнозу статичних похибок поверхні при фрезеруванні тонкостінних деталей [39] представляє собою стратегію віртуальної компенсації для промислового застосування. Ефективність підходу була підтверджена експериментально шляхом порівняння прогнозованих профілів похибок із результатами оптичних вимірювань поверхні деталей, оброблених за різних режимів різання. Застосування запропонованої числової моделі визначило похибки, зокрема для невеликих радіальних глибин різання, де наявність відхилення інструмента особливо впливає на формування поверхні. Віртуальна стратегія включає адаптивне керування кутом занурення для компенсації відхилення деталі під час обробки. Варто зауважити, що такий підхід може призводити до додаткового відхилення від заданої номінальної форми. Якщо в разі зменшення жорсткості деталі значно збільшувати кут занурення для компенсації падінь ефективності різання, може відбуватися явище нерівномірного видалення матеріалу через вигин деталі.

Дослідження щодо підтримки деталі малої жорсткості за допомогою струменя рідини [47], виконане за участю автора, наводить закономірності впливу струменя на характеристики коливань деталі. В результаті була

визначена теоретична можливість зменшення максимальної амплітуди коливань деталі та зсуву її характеристик в зони вищих частот обробки. Проте зв'язок між швидкістю струменя та силою впливу на поверхню за змінної жорсткості деталі не наводився, враховуючи це, технологія підтримки для процесу ґрунтувалася на струмені з постійними параметрами.

У дослідженнях застосовується швидкий метод розрахунку деформацій на основі зменшення матриці жорсткості [44]. Наведена ітеративна модель передбачення похибок, зумовлених силою різання, з урахуванням динамічної взаємодії інструмент-деталь. Дані експерименту з компенсацією показали, що надана модель зменшила похибку обробки більше, ніж на 53%, з високою ефективністю в реальному часі. Проте такі джерела похибок, як геометричні чи термічні, не компенсувалися. Подібних результатів досягнуто у методі розрахунку деформацій на основі розрахунку жорсткості матеріалу, видаленого фрезою з загальної жорсткості деталі [48].

Реалістична 3D термомеханічна модель MCE для розрахунку складної фізичної взаємодії між сферичною фрезою та тонкостінною алюмінієвою деталлю [42] побудована на основі явної моделі Лагранжевого формулювання. Матеріальна модель Johnson-Cook визначала поведінку матеріалу при інтенсивній деформації, швидкості руйнування матеріалу та температурі. Умови руйнування Johnson-Cook використовувалися для забезпечення контактної взаємодії та відокремлення стружки. Це дозволило отримати похибку форми, яка виникає через недоріз. Однак аналіз вимагав суттєвих часових витрат, оскільки зазначено, що для системи з оперативною пам'яттю 4 ГБ та тактовою частотою 3.9 ГГц типове моделювання видалення матеріалу за повного проходу інструменту вздовж 50 мм стінки займало близько 340-350 годин.

У іншому дослідженні [49] наводиться метод точного прогнозування стійкості до коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей, враховуючи ефект деформації, викликаного силою різання, однак, похибка розташування та можливості демпфування за низько швидкісного різання не визначена.

Метод генерації траєкторії руху інструмента [50] має перевагу у зменшенні загального часу обробки, що продемонстровано зменшенням часу, понад 20%, що досягнуто за рахунок змінних швидкостей подачі та глибини різання в кожному проході при збереженні відхилення деталі та інструмента в визначених межах. Однак, недостатня плавність траєкторій, і необхідність врахування динамічних характеристик потребує подальшого дослідження.

У роботі щодо 5-осьового адаптивного фрезерування поверхні деталей малої жорсткості [51] з онлайн вимірюванням, наведено зменшення похибки обробки до 70% у порівнянні з традиційною обробкою. Ітераційний алгоритм побудований на основі низки вимірювань відхилень, і за корекції траєкторії обробки, дозволив компенсувати деформації деталі.

Інша модель сервісно-орієнтованої безперервно-дискретної гібридної адаптивної системи фрезерування, заснована на швидкому онлайн плануванні процесів шляхом упаковки типових операцій у сервіси [52], та демонструє зменшення похибок биття за проведених експериментів. Слід враховувати, що на відміну від підходу попередньої підготовки виробництва [53-56] даний підхід може вимагати складних датчиків і необхідність алгоритмів обробки сигналів.

Ряд досліджень передбачає оптимізацію траєкторії фрезерування як ефективний спосіб підвищення стійкості тонкостінної обробки [57-60]. Аналогічний підхід [61] заснований на МСЕ, який оптимізує швидкість різання для зменшення вгинів і вібрацій під час обробки. Імпортований G-код розпізнає складну геометрію деталі та передбачає нелінійну поведінку і постійно підлаштовує швидкості шпинделя протягом обробки.

Перевага методу підтримки деталей малої жорсткості [62] полягає в підвищенні стабільності фрезерування за рахунок затискного столу, що налаштовується, який дозволяє контролювати динамічну жорсткість без втручання в зону різання. Ця концепція продемонструвала підвищення стабільності порівняно із звичайним затисканням, забезпечуючи потенційне вирішення проблеми регенеративних коливань. Для промислового застосування

можуть знадобитися подальші вдосконалення конструкції для зменшення маси столу, що рухається, при збереженні високої жорсткості затиску і підвищенні власних частот.

Моделювання обробки деталей з низькою жорсткістю [63] дає перевагу прогнозування сил різання та вібрацій при обробці тонкостінних деталей з кореляцією між результатами моделювання та експериментами за показників низьких амплітуд.

Алгоритм оптимізації послідовності різання для зменшення деформації деталі [64] показав перевагу зниження максимальної деформації заготівлі в процесі фрезерування з прогнозованим зниженням на 20% у наведеній стратегії та 63% порівняно з іншими стратегіями. Водночас існують кількісні відмінності між змодельованими та виміряними профілями поверхні, можливо, через такі фактори, як зміни сили різання та внесок у вигляді ефекту пружного відновлення, коли деталь виходить із зони контакту з інструментом і частково відновлює свою форму внаслідок пружної деформації.

В основі дослідження із онлайн компенсації похибок [65] лежить електричний компонент – п'єзоелектричний актуатор. Відбувається коригування відносного положення деталі та інструменту під час обробки. Система є окремою і не впливає на систему керування верстатом чи програмування траєкторій, проте суттєво впливає на вартість впровадження та подальшої експлуатації.

2.3.1 Модель методу адаптивної гідродинамічної підтримки

З метою удосконалити класичний технологічний процес засобами допоміжного технологічного забезпечення – вперше впроваджено метод гідродинамічної підтримки деталей малої жорсткості.

Адаптивний метод полягає у застосуванні струменя рідини (рисунок 2.4), як допоміжного пристосування при обробці. Відбувається попередня ітеративна адаптація параметру швидкості струменя рідин до заданого встановленого для

контролю параметру точності деталі, засобами ітеративного процесу обчислення до моменту досягнення збіжності.

Вздовж траєкторії подачі інструменту у процесі фрезерування жорсткість деталі змінюється. Запропонований метод одноточкової гідродинамічної підтримки струменем рідини передбачає застосування змінної сили впливу на поверхню, величина якої адаптується до складної кривизни профілю деталі на основі набору критичних точок. Додатково, ефективність струменевої підтримки, забезпечується, зокрема і поверхнею течії, вираженої особливостями обтікання різного профілю, як внутрішньої (увігнутої) так і зовнішньої (опуклої) частини. З цією метою розроблено ітеративний алгоритм адаптивного керування дією струменевої підтримки при фрезеруванні з урахуванням змінної жорсткості деталі та положення інструменту. Метод корисний з погляду рівномірної стабілізації зняття припуску та отримання рівномірної похибки в діапазоні допустимих значень і наближає обробку деталей з меншою жорсткістю до обробки більш жорстких.

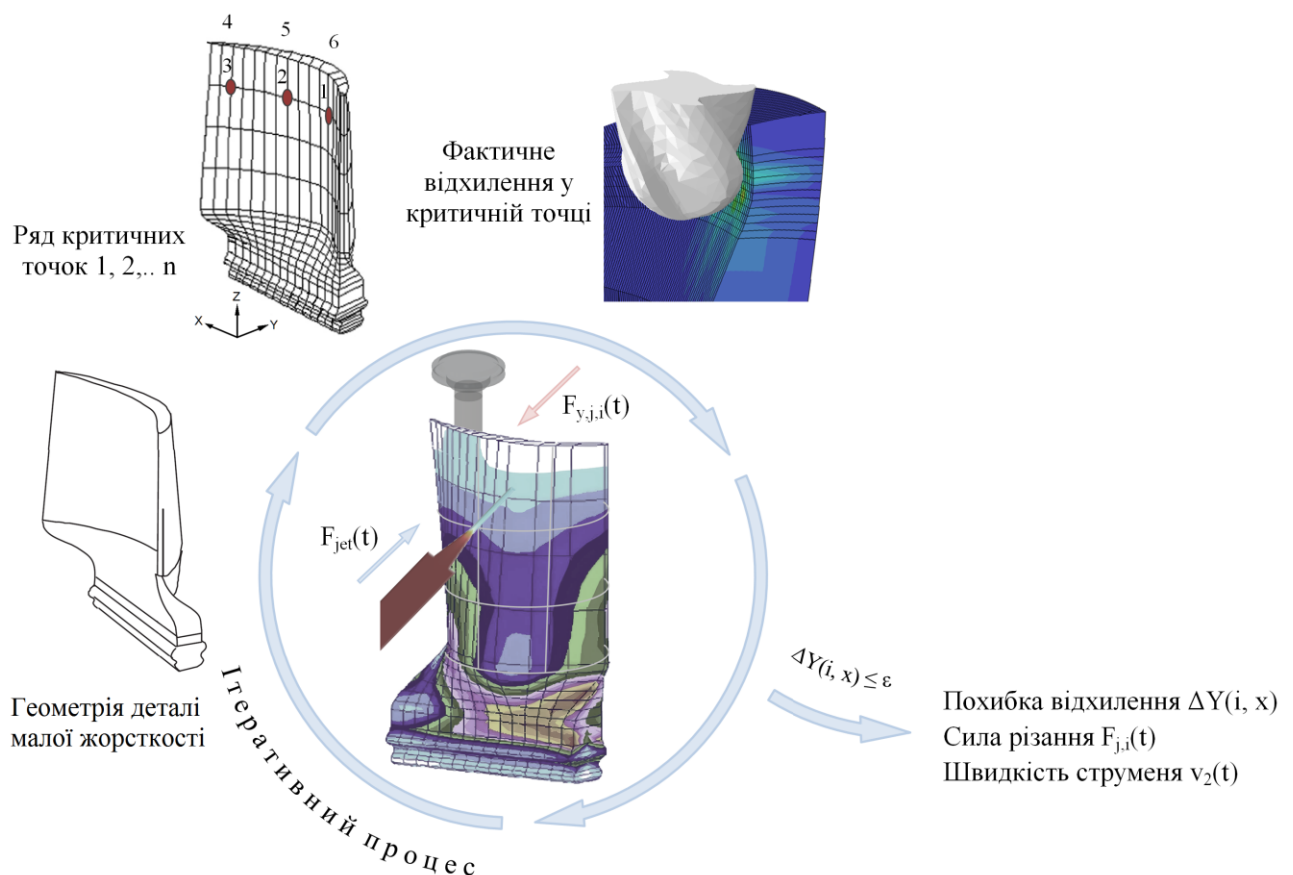


Рисунок 2.4 – Методологія адаптивного гідродинамічного обтікання

З точки зору практичного застосування, використання підтримки струменем рідини, фактично можна втілити на базі існуючого устаткування. Реалізація методу істотно не впливає на конструктивні та габаритні характеристики обладнання.

У процесі врізання зуба фрези, ряд компонентів сили різання, спрямованих до поверхні, призводять до великої кількості геометричних відхилень. Оскільки маложорсткі деталі схильні до пружних деформацій під дією тиску як з боку оброблюваної поверхні, так і зі зворотного боку, зменшення похибок обробки може бути досягнуто шляхом компенсації цих деформацій за допомогою керованої гідродинамічної підтримки.

Іншим важливим аспектом є вібрації. У процесі обробки дія ріжучої кромки фрези генерує циклічні впливи на поверхню деталі. Якщо частота навантаження збігається з власною частотою деталі малої жорсткості, амплітуда коливань збільшується [66, 67]. Таким чином, будь-яка зовнішня дія, як циклічне врізання зубів фрези, так і гідродинамічна протидія, впливає на частотні характеристики коливань деталі.

Для оцінки інтенсивності дії струменя рідини на ПС деталі та подальшого моделювання, необхідно визначити величину сили F_{jet} (рисунок 2.5), що діє на поверхню та швидкість потоку рідини v_2 .

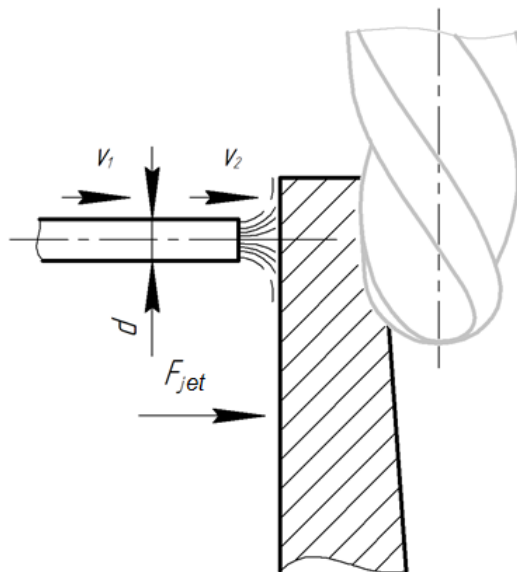


Рисунок 2.5 – Модель гідродинамічної підтримки

За граничних умов, що розглядається течія з низькою турбулентністю та ідеальна нестислива рідина, застосовується принцип Бернуллі (2.17) та рівняння неперервності (2.18):

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (2.17)$$

де p – тиск на поверхню;

ρ – густина рідини;

g – прискорення вільного падіння;

h – висота певної точки в рідині.

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \text{const} \quad (2.18)$$

де $A = \pi d^2/4$ – площа перерізу сопла.

Рівняння неперервності (2.18) стверджує, що при постійному потоці (масова витрата є сталою), з якою масою вхідний потік надходить у систему, з такою і виходить, виконується закон збереження маси. Швидкість потоку v_2 :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2p_1}{\rho}}. \quad (2.19)$$

Витрата рідини – $Q = A \cdot v_2$. Імпульс струменю, ґрунтуючись на визначенні імпульсу в класичній механіці – є добуток маси тіла та його швидкості. Відповідно побудованої адаптивної моделі, якщо варіювання швидкістю відбувається з урахуванням поточного часу t , сила струменю для плоскої стінки $F_{jet}(t)$:

$$F_{jet}(t) = \frac{1}{2}\pi d^2 p_1 = \rho Q v_2(t) = \rho \frac{1}{4}\pi d^2 v_2^2(t). \quad (2.20)$$

Рівняння передбачає ідеальні граничні умови з метою моделювання впливу гідродинамічної підтримки на деталь. Відсутність урахування таких

факторів, як турбулентність та втрати в системі, впливають на очікувану ефективність при реалізації технології.

Для попередньої оцінки інтенсивності дії струменя рідини на ПС деталі наведені сопла з діаметрами d_1 і d_2 – діаметр d_1 менше d_2 удвічі (рисунок 2.6).

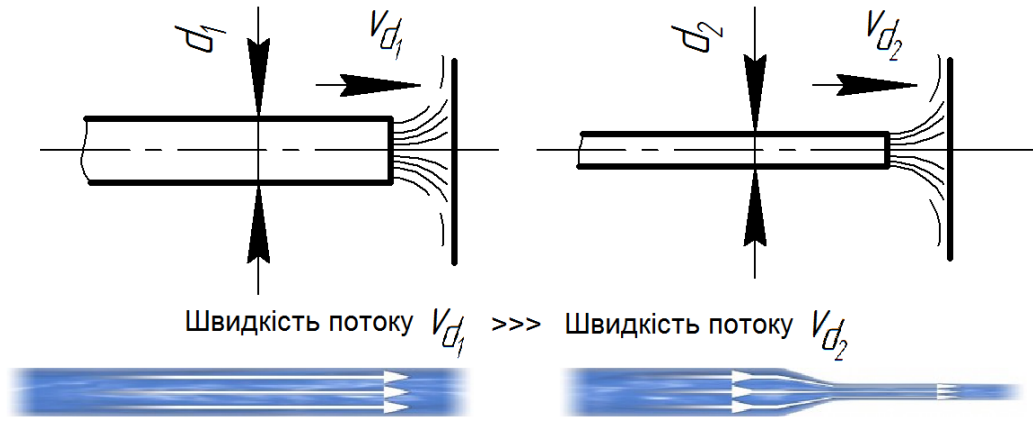


Рисунок 2.6 – Швидкості потоку рідини із соплами різного діаметру

Виконуючи перетворення, згідно (2.18):

$$v_{d1}A_1 = v_{d2}A_2, \quad (2.21)$$

$$v_{d1}\pi \frac{d_1^2}{4} = v_{d2}\pi \frac{d_2^2}{4}, \quad (2.22)$$

$$\frac{v_{d2}}{v_{d1}} = \frac{d_1^2}{d_2^2}. \quad (2.23)$$

Відповідно, якщо застосувати удвічі менший діаметр $d_2 = \frac{d_1}{2}$ у виразі (2.23), то $v_{d2} = 4v_{d1}$. Тобто, у результаті подальшого моделювання, з урахуванням наведених граничних умов, й що витрата стала $Q = const$, можна очікувати, що застосування сопла з удвічі меншим діаметром дозволить суттєво підвищити швидкість потоку.

Якщо розглядати варіант поверхні, яка наближено являє собою вигнуту стінку [100] (рисунок 2.6), що має ступінь свободи у напрямку руху струменя, де V – абсолютна швидкість струміння, a – площа струміння, u – швидкість

стілки по напрямку струменя, то відносна швидкість струміння рідини або швидкість, з якою струмінь діє на вигнуту стінку, буде дорівнювати $(V - u)$.

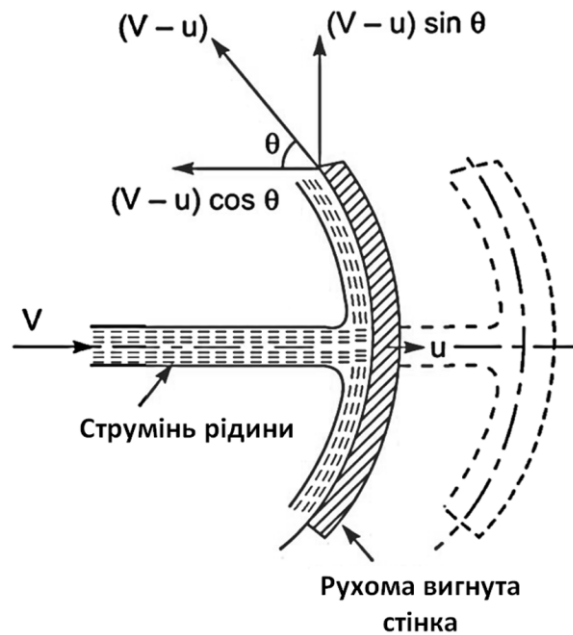


Рисунок 2.6 – Модель дії струменя рідини по рухомій вигнутій стінці

Якщо стінка гладка, і втрати енергії від удару струміння дорівнювати нулю, то швидкість, з якою струмінь залишить вигнуту стінку також дорівнює $(V - u)$.

Ця швидкість може бути розкладена на дві компоненти: одна в напрямку струміння, інша перпендикулярно напрямку струміння. Компонента швидкості в напрямку струміння дорівнює $-(V - u) \cos \theta$ (від'ємний знак приймається, оскільки на виході компонента спрямована в протилежному напрямку струміння).

Компонента швидкості в напрямку, перпендикулярному напрямку струміння дорівнює $(V - u) \sin \theta$.

Масова витрата рідини, яка вдаряє по стінці дорівнює $\rho \cdot a \cdot [\text{Швидкість, з якою струмінь вдаряє по стінці}]$, що дорівнює $\rho a(V - u)$.

Сила струменю рідини, що діє на вигнуту стінку в напрямку струміння, F_{jet} дорівнює $[\text{Маса, що вдаряє за секунду}] \cdot [\text{Абсолютна швидкість, з якою струмінь вдаряє по стінці в напрямку струміння - Кінцева швидкість}]$, тобто:

$$\begin{aligned}
 F_{jet} &= \rho a(V - u)[(V - u) - (-(V - u))\cos\theta] = \\
 &= \rho a(V - u)[(V - u) + (V - u)\cos\theta] \\
 &= \rho a(V - u)^2[1 + \cos\theta].
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

Підсумовуючи вищевикладене, u описує швидкість переміщення поверхні, яка в загальному випадку є функцією пружно-деформованого стану деталі. Тож, сила струменя залежить не тільки від параметрів потоку, але й від динамічної реакції деталі, що свідчить про взаємозв'язаний характер взаємодії “потік-структура”. Визначення швидкості u потребує розв'язання зв'язаної задачі гідродинаміки та деформування, що виходить за межі аналітичної складової та вирішується чисельними методами. Отже, якщо варіювання швидкістю відбувається з урахуванням поточного часу t , сила струменю для вигнутої стінки буде визначатися за $F_{jet}(t) = \rho A(v_2(t) - u(t))^2[1 + \cos \theta]$. Отримана узагальнена залежність дозволяє описати взаємодію струменя з криволінійною поверхнею в підході, що базується на зміні імпульсу потоку.

2.3.2 Ітеративний адаптивний алгоритм зменшення похибки відхилення з використанням методу гідродинамічної підтримки

Використання обчислювальних моделей дає змогу передбачати вплив різних параметрів обробки на деталь. Це дозволяє оптимізувати параметри перед початком процесу, зменшуючи кількість експериментів “проб і помилок”. Розроблення алгоритмів, які ефективно використовують обчислювані моделі, сприяє зменшенню часових витрат на проєктування та технологічну підготовку та максимізують продуктивність.

Адаптивні алгоритми грають вирішальну роль оптимізації процесів обробки деталей високої точності. Насамперед призначені для вирішення проблем, пов'язаних із забезпеченням ефективного видалення матеріалу при мінімізації деформацій та вібрацій. Основні цілі включають досягнення точності розмірів, чистоти поверхні та загальної цілісності деталі. Адаптивні стратегії для деталей малої жорсткості включають такі ключові міркування:

- аналіз матеріалу та геометрії: передбачає оцінку властивостей матеріалу й геометричних особливостей деталі для вибору оптимальної траєкторії інструменту та параметрів різання;

- динамічне моделювання: використовується для прогнозування деформацій і вібрацій під час обробки. Методи МСЕ та інші підходи дають змогу коригувати параметри процесу;

- оптимізація траєкторії інструменту: адаптивні алгоритми змінюють траєкторію різання на основі даних у реальному часі, враховуючи зміни властивостей матеріалу та геометрії деталі для зменшення сил різання і запобігання деформаціям;

- змінні швидкості подачі та обертів: адаптивні алгоритми обробки оптимізують швидкість подачі та швидкість шпинделя в залежності від поточних умов різання. Це допомагає підтримувати постійне навантаження на стружку і зводить до мінімуму можливість відхилення інструменту або деталі внаслідок надмірних сил різання;

- контроль взаємодії інструменту: особливе значення для обробки деталей малої жорсткості. Адаптивні алгоритми дають змогу контролювати і регулювати глибину різання, щоб уникнути перевантаження інструменту та знизити вібрації у процесі різання;

- моніторинг у процесі обробки: системи датчиків і зворотного зв'язку забезпечують безперервний контроль умов обробки, дозволяючи оперативно коригувати параметри процесу та запобігати зношуванню інструменту й деформації деталі;

- стратегії демпфування: використання стратегій демпфування, таких як використання різальних інструментів з вбудованими функціями демпфування або додавання допоміжних пристроїв, що демпфують, або підходів, допомагає знизити вібрації під час обробки деталей малої жорсткості;

- адаптивне охолодження: контроль температури має важливе значення для запобігання тепловій деформації деталей малої жорсткості. Адаптивні алгоритми охолодження регулюють витрату та температуру охолоджувальної

рідини в залежності від поточних умов обробки, щоб підтримувати стабільну температуру протягом усього процесу;

– інтеграція із системами ЧПУ: безшовна інтеграція адаптивних алгоритмів із системами ЧПУ забезпечує зв'язок та координацію в реальному часі між обробним обладнанням та алгоритмом, що дозволяє оперативно вносити зміни для оптимізації обробки.

Загалом, розроблення та реалізація адаптивних алгоритмів деталей малої жорсткості вимагають міждисциплінарного підходу, що поєднує знання в галузі прикладної механіки, динаміки різання, програмування, матеріалознавства та систем управління для досягнення точності та ефективності у проектуванні виробничого процесу.

У роботі моделюється фактичне відхилення за механічної обробки в системі CAE і виконується для аналітичного розрахунку фактичного початкового кута врзання для деталі малої жорсткості. У такий спосіб для конкретної критичної точки можна отримати актуальне значення в заданій ділянці. Моделювання можливо виконати лише одноразово для найбільш відповідальної ділянки деталі – найбільш критичної точки. Проте, кількість ітерацій обчислення ітераційним блоком докладання спрямованої сили залежить від кількості заданих критичних точок. Чим більше точок, тим точніше вхідні дані, отже, менше значень необхідно обробити до досягнення збіжності (досягнення встановленого параметру точності) та виконати менші обчислювальні витрати ітераційного блоку.

Результатами адаптивного ітераційного підходу (рисунок 2.7) є визначення фактичної швидкості струменя гідродинамічної підтримки та відхилення деталі. Зв'язок силового впливу при фрезеруванні та змінної жорсткості деталі визначають те, що механіка процесу різання не залишається постійною. Відповідно, для досягнення необхідної точності при фрезеруванні складних деталей малої жорсткості швидкість струменя гідродинамічної підтримки є змінною, і залежить від геометричних характеристик деталі й заданій точності.

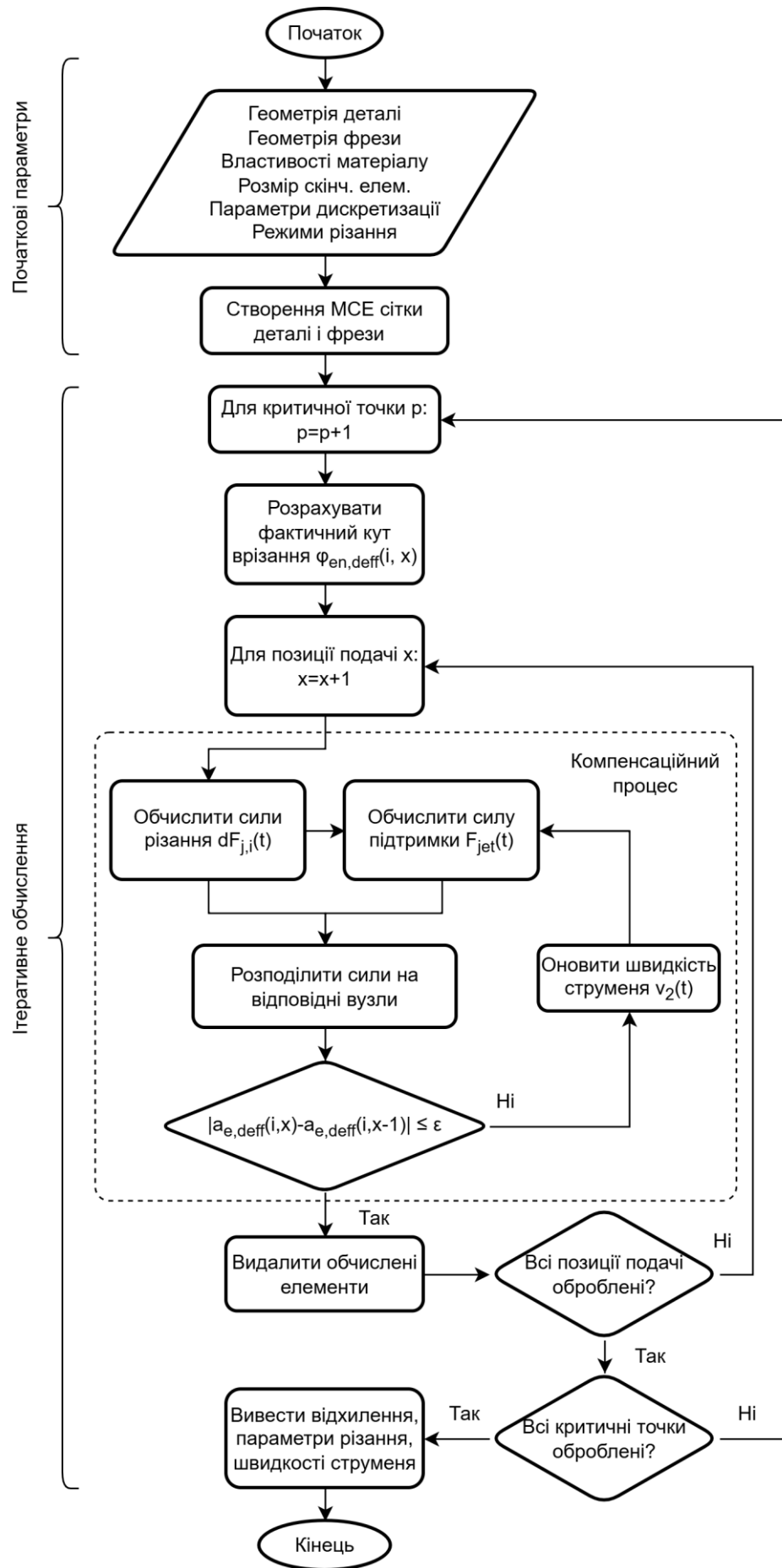


Рисунок 2.7 – Адаптивний алгоритм гідродинамічної підтримки

Відповідно до наведеного встановлюється набір критичних точок уздовж проходу кінцевої фрези. У кожній точці визначається фактичне відхилення, яке використовується для розрахунку параметрів різання для ділянки конкретної точки. Подальші обчислення ґрунтуються на адаптивному підході, що полягає у розподілі ріжучих та підтримуючих сил на відповідні вузли сітки МСЕ.

Враховуючи зазначене, швидкість $v_2(t)$ підтримки струменем рідини оновлюється згідно умови точності:

$$|a_{e,deff}(i, x) - a_{e,deff}(i, x - 1)| \leq \varepsilon. \quad (2.25)$$

Процес повторюється до досягнення збіжності розрахунку, після чого виконується видалення оброблених елементів та перехід до наступної позиції. Для визначення відхилення деталі за дії гідродинамічної підтримки необхідно послідовно виконати розрахунок для всіх заданих критичних точок.

2.4 Теоретичні основи моделювання гармонічного відгуку пружної системи деталі за гідродинамічної підтримки

Розглядається тонкостінна пружна конструкція, на яку з одного боку діє зовнішнє гармонічне навантаження, а з протилежного струмінь рідини, що створює локальну силову взаємодію з поверхнею.

Застосування повноцінного FSI-аналізу для дослідження процесу гідродинамічної підтримки тонкостінної деталі під час фрезерування є методологічно можливим, однак повний двосторонній підхід передбачає одночасне розв'язання задач гідродинаміки потоку та деформування конструкції з постійним обміном даними між CFD- і FEM-моделями, що суттєво ускладнює забезпечення збіжності і потребує значних обчислень для багатопараметричної моделі. Для реального процесу характерна наявність великої кількості невизначених або важко формалізованих параметрів, зокрема локальної турбулентності, зміни геометрії контактної області, коливань технологічних режимів і реальних характеристик жорсткості системи, що обмежує практичну доцільність подібного чисельного моделювання. За таких

умов використання певної інженерної апроксимації є більш раціональним підходом, оскільки дозволяє адекватно описати основні закономірності гідродинамічного тиску та його впливу на жорсткість деталі за дії циклічного впливу.

Для врахування впливу струменя на АЧХ конструкції в рамках лінійного гармонічного аналізу застосовано параметр Elastic Foundation Stiffness в середовищі скінченно-елементного аналізу ANSYS, що є феноменологічним представленням взаємодії конструкції з пружною основою. З точки зору механіки пружних деформацій, цей параметр базується на гіпотезі Вінклера, яка розглядає основу як сукупність незалежних лінійних пружин. В основі параметра лежить припущення, що реакція основи в будь-якій точці прямо пропорційна нормальному відхиленню поверхні в цій точці, що виражається фундаментальним рівнянням:

$$p(x, y) = k \cdot w(x, y), \quad (2.25)$$

де p – контактний тиск, Н/мм² або МПа;

w – відхилення поверхні, мм;

k – коефіцієнт жорсткості основи, Н/мм³.

Таким чином, $k = p / w$ описує кількість мегапаскалів тиску, яку необхідно прикласти до 1 мм² поверхні, щоб спричинити зміщення на 1 мм.

У ANSYS параметр Elastic Foundation Stiffness інтегрується безпосередньо в глобальну матрицю жорсткості системи. Для скінченного елемента на поверхні, де прикладено підтримку, внесок у матрицю жорсткості розраховується через віртуальну роботу:

$$\delta U = \int_A \delta w \cdot p \cdot dA = \int_A \delta w \cdot (k \cdot w) \cdot dA. \quad (2.26)$$

Переходячи до вузлових переміщень $\{u\}_e$ та функцій форми $[N]$:
 $w = [N] \cdot \{u\}_e$, матриця жорсткості основи:

$$[K_{found}]_e = \int_A k [N]^T [N] dA. \quad (2.27)$$

Наведена матриця додається до матриці жорсткості самого елемента, що призводить до збільшення діагональних членів матриці, забезпечуючи стабілізацію моделі. Параметр k фактично є градієнтом тиску по глибині деформації. Якщо $k \rightarrow \infty$ – підтримка стає абсолютно жорсткою, якщо $k \rightarrow 0$ – підтримка відсутня, поверхня вільна. На відміну від модуля пружності матеріалу E , який описує внутрішні властивості, k є граничним параметром взаємодії. Він абстрагує складні деформаційні процеси, що відбуваються за межею геометрії моделі, перетворюючи їх на еквівалентний поверхневий опір.

Параметр Elastic Foundation Stiffness використовується для апроксимації впливу струменя рідини. Сила, що створюється струменем визначається законом збереження імпульсу $F = \rho A v^2$, де ρ – густина рідини, A – площа струменя, v – швидкість потоку. У межах малих переміщень w , характерних для гармонічного аналізу, залежність сили від переміщення поверхні може бути лінеаризована:

$$F(w) = F_0 + \left(\frac{dF}{dw} \right) w, \quad (2.28)$$

де F_0 – статична складова і не впливає на власні частоти, друга частина рівняння відповідає за динамічну поведінку і визначається похідною, що інтерпретується як еквівалентна жорсткість:

$$k_{eq} = \frac{dF}{dw}. \quad (2.29)$$

Для використання у середовищі ANSYS еквівалентна жорсткість переводиться у параметр Elastic Foundation Stiffness [101], тобто жорсткість, віднесена до площі контакту:

$$k_f = \frac{k_{eq}}{A_{eff}}, \quad (2.30)$$

де A_{eff} – ефективна площа взаємодії струменя з поверхнею. У найпростішому випадку приймається рівною площі сопла.

Висновки за розділом 2

Удосконалено математичну модель статичної складової відхилення деталей з нерівномірною малою жорсткістю, шляхом врахування прикладання сили різання у довільній точці вільної частини елемента, що дозволяє адекватно описувати зміну пружних деформацій уздовж поверхні деталі.

Модель визначення компонентів сили різання при бічному фрезеруванні, ґрунтується на моделі класичної кругової траєкторії руху ріжучої кромки фрези. Підхід дозволяє визначати зміну силових навантажень у процесі обробки.

Удосконалено ітеративний адаптивний алгоритм оброблення деталей, шляхом інтеграції моделі керування інтенсивністю гідродинамічної підтримки, що зменшує та вирівнює похибки залежно від положення інструмента та прогнозованої величини відхилення, що дозволяє забезпечити узгоджену зміну параметрів підтримки протягом циклу обробки.

Для виконання моделювання гармонічного відгуку пружної системи деталі застосовано параметр Elastic Foundation Stiffness, що виступає інструментом врахування взаємодії конструкції з гідродинамічною підтримкою. У роботі параметр використовується як еквівалентна лінеаризована жорсткість, що апроксимує вплив струменя рідини на конструкцію. Відповідно, є еквівалентною пружною основою, що створює додатковий опір переміщенню поверхні.

Зміст розділу відображено у таких наукових публікаціях: наведено важливі аспекти поведінки пружної системи за збігу частот, а також адаптивні методи її стабілізації [45, 46, 47, 66, 67]. Результати розділу формують методичне підґрунтя для виконання скінченно-елементного та гармонічного аналізу.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МЕХАНІЧНОЇ
ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЇ ЖОРСТКОСТІ

3.1 Моделювання процесів механічної обробки в CAE системах

При підготовці сучасного виробництва, програмні рішення поділяються на спеціалізовані, які найкраще підходять для моделювання процесів механічного руйнування матеріалів, такі як DEFORM, AdvantEdge, LS-DYNA та більш універсальні, які вирішують різноманітні завдання – ANSYS Workbench, Abaqus, COMSOL Multiphysics, SOLIDWORKS Simulation.

У розділі, для порівняння характеристик CAE систем, наведено аналіз та критерії оцінки, що зведено до оціночних показників на рисунку 3.1.

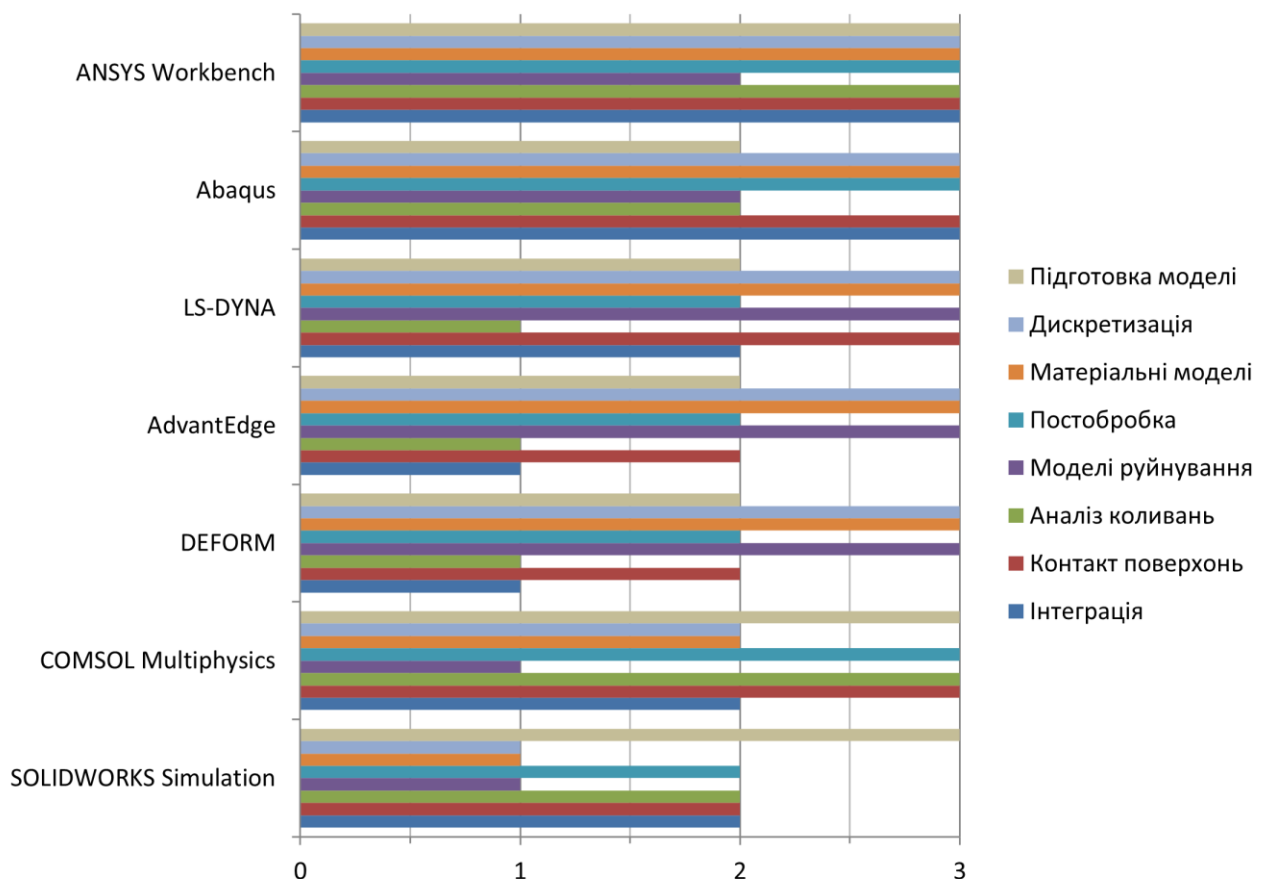


Рисунок 3.1 – Порівняльний аналіз характеристик CAE систем

Значний внесок у дослідження моделювання процесів механічної обробки зробили такі вчені як С. С. Добротворський, В. А. Залога, Д. В. Криворучко, S. Ratchev, S. Wimmer, G. Bolar, Y. Altintas, E. Budak та інші. Роботи з аналізу CAE-систем для моделювання таких процесів, свідчать, що підходи істотно відрізняються за глибиною, критеріями оцінювання та фокусом.

У роботі, присвяченій динамічній оцінці конструкцій [68], за дії ударних або змінних навантажень, CAE системи порівнюються на здатність адекватно відтворювати нелінійну поведінку матеріалів, контактну взаємодію, швидкоплинні процеси. Підкреслюється, що універсальні пакети як ANSYS, демонструють високу ефективність у задачах квазістатички та гармонійного аналізу, тоді як Abaqus має переваги у моделюванні складної нелінійної поведінки та контактів. LS-DYNA широко застосовується для задач високошвидкісної динаміки, ударних процесів і руйнування матеріалів, завдяки потужному використанню Explicit обчислення.

В роботі з аналізу CAE-систем [69] порівняння виконується розв'язанням однакових інженерних задач. У роботі аналізуються відмінності у результатах розрахунків, обчислювальній ефективності та зручності користування. Показано, що навіть при однакових граничних умовах і геометрії результати можуть відрізнятися через різні реалізації чисельних алгоритмів, моделей матеріалів, контактних підходів. Тому є важливим застосування багатокритеріального підходу до оцінювання CAE систем.

У деяких аналітичних матеріалах [70, 71] де проводиться розмежування між неявними (implicit) та явними (explicit) методами інтегрування, неявні методи, реалізовані в ANSYS Mechanical та Abaqus, розглядаються як ефективні для статичних і квазістатичних задач. Явні методи переважно застосовуються для високої стабільності моделювання швидкоплинних нелінійних процесів, де важливими є стабільність обчислень за малих часових кроків і складних взаємодій. Водночас, з огляду на широке застосування Abaqus/Explicit, у науковому середовищі його часто вважають одним із

найбільш розвинутих для складних явних симуляцій притаманних моделям руйнування, ударних процесів та моделювання механіки різання.

Загальний аналіз джерел показує, що більшість існуючих досліджень фокусуються лише на обмеженій кількості програмних продуктів, зазвичай 2-3 системи. Також, критерії оцінювання не є уніфікованими і здебільшого орієнтовані або на чисельні характеристики, бенчмарки або на зручність використання. У більшості робіт недостатньо уваги приділяється специфічним прикладним задачам, таким як моделювання процесів механічної обробки, різання або аналіз гармонічних коливань у механічних системах, тому існує необхідність застосування комплексного підходу саме для наведених потреб.

Отже, слід зазначити, що в наукових роботах існують підходи до детального порівняння CAE-систем, однак вони базуються на інших наборах критеріїв та іншому обсязі систем. Запропоновано наступні критерії оцінювання CAE систем (1-3 бали) для кожної системи:

Підготовка моделі. 3 – розвинена інтеграція CAD/CAE, тобто імпорт/експорт (STEP, IGES, Parasolid та ін.), параметризація геометрії, редагування та спрощення моделей, задання контактних пар між тілами. 2 – імпорт/експорт геометрії та базове редагування моделей, обмежена параметризація. Інструменти підготовки геометрії до складних нелінійних задач обмежені. 1 – Базове створення або імпорт геометрії без розвинених можливостей редагування та параметризації.

Дискретизація. 3 – підтримка різних чисельних методів FEM, SPH, адаптивне ремешування, локальне згущення сітки, контроль якості елементів. 2 – дискретизація з вибором типів елементів та базовим контролем параметрів сітки, як розмір, згущення. 1 – базове автоматичне накладення сітки з мінімальними налаштуваннями. Відсутність альтернативних чисельних методів.

Матеріальні моделі. 3 – розширений набір матеріальних моделей: пружні, пластичні, моделі руйнування, як Johnson-Cook, та інші, що враховують деформації та температури. 2 – базові матеріальні моделі (пластичність,

температурна залежність). Обмежена кількість моделей руйнування. 1 – обмежений набір матеріальних моделей. Відсутність моделей руйнування, термомеханічної поведінки, зазначення швидкості деформації. Неможливість розширення бібліотеки матеріалів.

Постобробка. 3 – візуалізація напружень, деформацій, температур, контактних параметрів, сил різання, Harmonic Response, експорт даних, генерація звітів. 2 – візуалізація лише напружень, деформації, переміщення, обмежений аналіз динамічних або частотних характеристик. 1 – базове графічне відображення результатів без розширених можливостей.

Моделі руйнування. Моделювання процесів механічної обробки. 3 – спеціалізовані можливості моделювання процесів різання, стружкоутворення, термічні ефекти, складна кінематика. 2 – процеси різання можливо моделювати загальними інструментами. Обмежені спеціалізовані алгоритми. 1 – відсутність можливості ефективно моделювати процеси різання, спрощене представлення взаємодії.

Аналіз коливань. 3 – повна підтримка модального та гармонічного аналізу: визначення власних частот і форм коливань. 2 – модальний аналіз і базовий гармонічний аналіз. Обмежені можливості врахування демпфування. 1 – відсутність або мінімальна підтримка модального і гармонічного аналізу.

Контакт поверхонь. 3 – розвинені контактні алгоритми поверхня-поверхня, самоконтакт, ерозійний контакт, FSI, CFD. 2 – наявні базові контактні алгоритми з можливістю задання коефіцієнта тертя, типу контакту. Складні контакти реалізуються з обмеженнями. 1 – суттєво обмежені можливості контактної взаємодії.

Інтеграція. 3 – підтримка скриптів Python, APDL, User Subroutines, API для інтеграції з іншими системами CAD/CAM/CAE, можливість пакетних розрахунків, оптимізації, параметричних досліджень. Інтеграція в цифрові виробничі системи. 2 – обмежені можливості автоматизації, тобто наявність інструкцій або часткової підтримки скриптів. 1 – мінімальна підтримка автоматизації та інтеграції.

Відповідно до поставлених технологічних завдань, варто звертати увагу на можливості реалізації CAE системою SPH-метода (гідродинаміки згладжених частинок), саме цей метод підходить для моделювання випадків, у яких переважає складна динаміка меж, та відбувається їхнє значне зміщення, як у гідро- газодинамічних взаємодіях з рухомими об'єктами складної форми.

До загальних рекомендацій моделювання механічної обробки відносяться: наявність гнучкого інтерфейсу налаштування параметрів, застосування різних критеріїв руйнування, деформації матеріалу, можливості створення сіток скінчених елементів із використанням різних алгоритмів.

У результаті аналізу можна зробити узагальнення характеристик CAE систем. Найкращими для окремого моделювання процесів різання є AdvantEdge, DEFORM, LS-DYNA. Для виконання Harmonic Response аналізу найкраще застосовувати ANSYS Workbench, COMSOL. У разі необхідності моделювання складного контакту в поєднанні з мультифізикою - ANSYS Workbench, Abaqus, COMSOL. Найкраща інтеграція та автоматизація реалізовані в ANSYS, Abaqus.

При дослідженні власних частот, гармонічного відгуку пружної системи зразка малої жорсткості використано програмний пакет Ansys Workbench.

Термомеханічні моделі цього розділу були розроблені в Abaqus. Комплекс Abaqus складається з набору програм для аналізу скінченими елементами та автоматизованої інженерії, розроблення якого підтримується оновленнями донині. Abaqus входить до компанії Dassault Systems. Головною концепцією розвитку Abaqus є розроблення універсального середовища SIMULIA, яке узагальнює рішення Dassault Systems та Abaqus в напрямку розрахунків на міцність, та об'єднує найкращі рішення продуктів третіх компаній, що дає змогу розвивати сучасний інструментарій реалістичного проектування в напрямі аналізу складних конструкцій. Середовище SIMULIA дає змогу виконувати моделювання процесів наближено до реальності, щоб зменшити кількість проведення експериментів та сприяти розвитку інновацій.

Abaqus вирізняється своєю гнучкістю та можливістю інтеграції з багатьма третіми рішеннями. Продукти Abaqus використовують скриптову мову з відкритим кодом Python для створення скриптів та конфігурації. Це дає змогу виконувати трудомісткі завдання, автоматизувати повторювані завдання, оперувати інформацією з баз даних, отримувати звіти про рішення статичних та динамічних задач. Введення і виведення даних можливо у фоновому режимі без запуску графічного інтерфейсу, що скорочує час отримання результатів. Завдяки інтеграції з Excel, на основі отриманих значень будуються діаграми і є можливість оцінити ступінь впливу того чи іншого чинника на загальний характер напружено-деформованого стану та вжити рішень щодо його зниження в критичних зонах.

Наведені переваги інтеграції сприяють перспективі розвитку та розробці зовнішніх графічних оболонок для проведення як загальних аналізів за допомогою MCE, так і міждисциплінарного характеру з метою реалізації розрахунків у середовищах що відповідають спеціальним потребам технологічного забезпечення.

3.2 Аналіз фізико-механічних показників високошвидкісного фрезерування деталей малої жорсткості

При високошвидкісній фрезерній обробці деталей малої жорсткості, визначення оптимальної технології обробки та критеріїв вибору технічних параметрів безпосередньо впливає на відповідність технічним вимогам та, головним чином, на ступінь геометричних відхилень. Основні проблеми в процесі обробки здебільшого зумовлені схильністю деталей малої жорсткості до пружної деформації під дією зовнішнього впливу.

Відхилення у процесі обробки помітно обмежують продуктивність видалення матеріалу, тому, як правило, проблема відхилень вирішується додатково розробленим оснащенням, пристосуваннями або рішеннями, що, безумовно, підвищують сумарну вартість виробу. Однак, проблему треба розглядати з прикладного боку, і, залежно від технічних вимог до якості

поверхні, іноді достатнім є впровадження рішень без залучення додаткового оснащення, віддаючи перевагу методам не явного впливу на поверхню деталі малої жорсткості, як оптимізація параметрів режимів різання, вибір інструменту певної геометрії чи використання спеціальної оптимізованої технології обробки.

Такий підхід дає змогу забезпечити швидку модернізацію виробництва, адже не потребує залучення та розроблення складного додаткового оснащення.

З погляду переваг використання сучасного обладнання у виробництві, багатокоординатні верстати дають змогу позиціонувати виконавчі органи практично під будь-яким кутом до поверхні обробки.

З погляду переваг використання можливостей сучасних CAE середовищ, попередній аналіз дає змогу спрогнозувати низку фізико-механічних показників в зоні обробки, зокрема таких як складові реакції сили деформаційного руйнування за заданими критеріями, величини напружень, температур. Це, у свою чергу, посприяло провести як дослідження оптимізованої класичної технологій обробки та технології із застосуванням допоміжного технологічного оснащення.

3.2.1 Прогнозування характеристик процесу різання з урахуванням моделей руйнування

Аналізуючи та порівнюючи показники сили різання, залежно від обраної технології, важливим є оцінювання не тільки сумарної сили, а і її складових, тому що певні складові сили різання безпосередньо впливають на пружну деформацію деталей малої жорсткості в процесі обробки.

У цьому підрозділі розглядається технологія бічного фрезерування, що відображає класичну технологію обробки деталей малої жорсткості – обробка ведеться лінійно, паралельно висоті вільної частини деталі, бічною ріжучою кромкою кінцевої фрези.

Моделювання обробки конструкційних матеріалів та їхніх експлуатаційних показників представляє складне завдання під час аналізу,

насамперед через високу швидкість деформації. Такі умови призводять до підвищення температури та пов'язаних із цим змін властивостей матеріалу, мікроструктури та процесів деформації. Тому важливо обрати таку модель поведінки матеріалу, яка б враховувала ці чинники.

Поведінка матеріалу при руйнуванні прогнозована за допомогою емпіричної моделі Джонсона-Кука [72, 73]. Модель дає змогу враховувати ефекти зміцнення, зміни температури і пов'язану з цим зміну швидкості деформації, широко застосовується для прогнозування сил різання, морфології стружки, залишкових напружень і температур у зоні обробки.

Модель набула поширення в моделюванні статичних і динамічних процесів металообробки [74-76] та має лаконічну форму. Напруження пластичної деформації визначається формулою, яка відображає криву деформації матеріалу:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right), \quad (3.1)$$

де ε – ефективна пластична деформація;

$\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ – швидкість деформації та нормалізована величина схильності до деформації ($\dot{\varepsilon}_0 = 1$ с);

T_{melt} – температура плавлення;

T – поточна температура;

T_{room} – кімнатна температура;

A, B, C, n, m – константи матеріалу, отримані з опублікованої літератури та наведені в таблиці 3.1. Константи залежать від властивостей матеріалу, та отримуються експериментально. Найбільш поширеними тестами, що використовуються для ідентифікації коефіцієнтів матеріалу, є статичні випробування на розтяг та стиск, динамічні випробування, включаючи тест Тейлора та тест Спліт-Хопкінсона.

Перший вираз в дужках характеризує деформаційне зміцнення – залежність напруження текучості від величини пластичної деформації, тобто

показує, як матеріал зміцнюється зі зростанням пластичної деформації. Другий вираз в дужках показує вплив швидкості деформації на межу текучості матеріалу – враховує підвищення міцності матеріалу при збільшенні швидкості навантаження. Третій вираз в дужках демонструє температурний розм'якшувальний ефект на межу текучості матеріалу [77-79].

Пошкодження є процес, який поступово знижує опірність матеріалу, що призводить до повного його руйнування. Модель пошкодження (англ. damage model) Джонсона-Кука використана разом з моделлю пластичності Джонсона-Кука, що базується на значенні еквівалентної деформації в точках інтеграції елементів. Передбачається, що руйнування відбувається, коли параметр пошкодження перевищує значення одиниці. Моделі пошкодження Джонсона-Кука підкоряються кумулятивному закону і записується у вигляді рівняння:

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f} \right) \quad (3.2)$$

Еквівалентна пластична деформація $\Delta \bar{\epsilon}$ перераховується при кожному інкременті аналізу відповідно до моделі пошкодження. Еквівалентна деформація при руйнуванні $\bar{\epsilon}_f$ задається рівнянням:

$$\bar{\epsilon}_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right) \right], \quad (3.3)$$

де σ_m – середнє напруження;

$\bar{\sigma}$ – результуюче еквівалентне напруження по Мізесу;

D_1 – початкове значення деформації руйнування;

D_2 – нормативний експоненціальний фактор;

D_3 – фактор тривісності;

D_4 – фактор швидкості деформації;

D_5 – тепловий фактор.

Значення емпіричних констант пошкоджень D_i (де $1 \leq i \leq 5$) для сплаву AISI 4340 наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Johnson-Cook константи сплаву сталі AISI 4340 [77]

Модель	Johnson-Cook константи				
J.C. модель пластичності	A , МПа	B , МПа	n	C	m
	792	510	0,26	0,014	1,03
J.C. модель руйнування	D1	D2	D3	D4	D5
	0,05	3,44	-2,12	0,002	0,61

Енергія руйнування елементів визначається за формулою:

$$G_f = \frac{(1 - \nu^2)}{E} K_c^2, \quad (3.4)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль Юнга;

K_c – в'язкість при руйнуванні.

Імплементація та використання наведених рівнянь для вирішення в аналітичному вигляді деформації складних тривимірних моделей, є зазвичай надскладним завданням. Більш продуктивним рішенням є використання методу скінченних елементів із застосуванням наведених критеріїв поведінки матеріалу [78-80].

Моделювання процесів різання здобуло на цей час значного розвитку, забезпечуючи можливість прогнозування форми, розмірів стружки й обробленої поверхні, напружено-деформованого стану, температурних полів, проєкції сили різання, залишкових напружень, у разі необхідності навіть із підведенням додаткового енергетичного впливу. Водночас, результати моделювання мають бути забезпечені точністю в підготовці даних і достатньо досконалим алгоритмом моделювання руйнування й тертя [81-85].

У багатьох роботах [86-92] автори пропонують для моделювання процесів різання використовувати Abaqus/Explicit, а для визначення гармонічного відгуку системи застосовувати ANSYS [93-98]. Термомеханічна модель MCE була розроблена в Abaqus/Explicit. Однією з переваг цієї системи є те, що шаг сітки кінцевих елементів можна змінювати вибірково для окремих частин

геометрії і у такий спосіб ефективно керувати кількістю генерованих елементів. Разом з тим, для моделювання механічної обробки це дозволяє одночасно забезпечувати можливість зняття припуску без проблем збіжності, локально підготовлюючи область моделі до контактної взаємодії леза з поверхнею. Локальна підвищена щільністю сітки дає змогу також досліджувати зони деформації з більшою точністю.

3.3 Визначення сил різання за технології бічного фрезерування деталі малої жорсткості

Для проведення дослідження застосування технологій виготовлення деталей малої жорсткості як об'єкт дослідження обрано осьову лопатку турбіни наведену на рисунку 3.1. Лопатки турбін відіграють ключову роль у ефективності та продуктивності різних механічних систем, оскільки безпосередньо впливають на ефективність перетворення енергії потоку робочого середовища та загальну продуктивність агрегату. Характерною особливістю таких деталей є складна просторово-криволінійна геометрія та наявність тонкостінних ділянок, що зумовлює їх низьку жорсткість і підвищену схильність до пружних та пластичних деформацій під час механічної обробки. Геометричні параметри деталі визначаються довжиною лопатки L , шириною профілю b , товщиною біля хвостової частини h_0 . Товщина найвужчої частини перерізу в області вершини – h_1 , різниця товщини $\Delta h = h_0 - h_1$, а також відносний показник – параметр змінності товщини лопатки $\Delta h/h_0 = 0,571$, який свідчить про значне зменшення жорсткості у верхній частині деталі та підвищену потенційну чутливість до впливу сил різання.

Різальним інструментом обрано кінцеву 4-зубу сферичну фрезу діаметром 8 мм із кутом нахилу гвинтової канавки 30° . Матеріалом інструмента є твердий сплав на основі карбиду вольфраму, що характеризується високою твердістю, зносостійкістю та здатністю працювати при підвищених температурах різання. Для забезпечення достовірності результатів моделювання виконано термомеханічний аналіз процесу фрезерування з

одночасним врахуванням механічної взаємодії інструмента та заготовки, а також теплових явищ, що виникають у зоні різання внаслідок пластичної деформації матеріалу та тертя на контактних поверхнях. Аналіз температурного стану різального інструмента дає змогу визначити температурні навантаження на ріжучі кромки, оцінити умови теплоутворення, перевірити відповідність обраних режимів різання вимогам та у порівнянні з температурними показниками стружки оцінити умови тепловідведення.

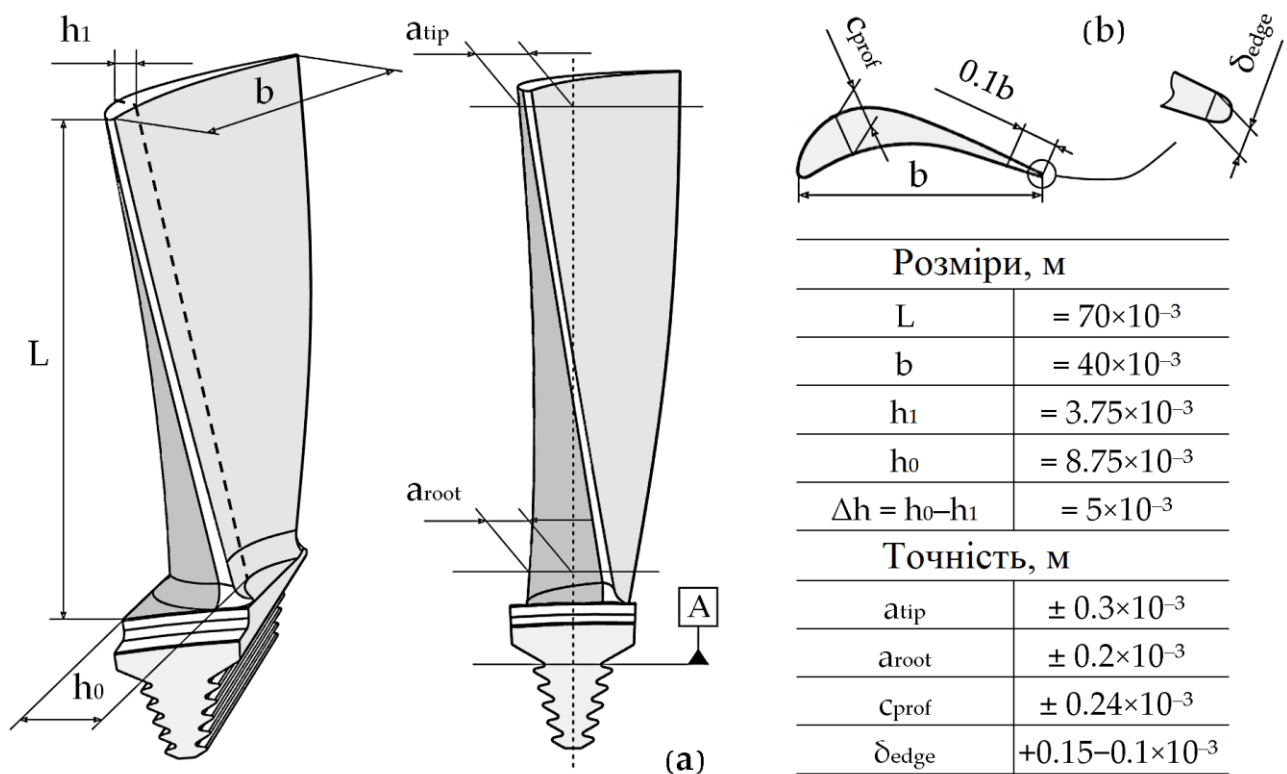


Рисунок 3.1 – Геометричні параметри осьової лопатки турбіни

У моделі враховано пружно-пластичну поведінку матеріалів заготовки та інструмента із введенням відповідних критеріїв пластичності й руйнування, що дозволяє більш точно описати процес формування стружки та прогнозувати можливі дефекти обробленої поверхні. Для відтворення реальних умов закріплення деталі вузол основи лопатки був повністю позбавлений ступенів свободи, що імітує жорстке кріплення заготовки в технологічному оснащенні. Переміщення інструмента задавалося через швидкість подачі у визначеному напрямку, тоді як фрезі надавалася кутова швидкість обертання відносно

центру власної системи координат. Наведені граничні умови забезпечують безпосереднє відтворення кінематики процесу фрезерування та дозволяють отримати ряд результатів щодо розподілу напружень, деформацій, температурних полів і попередньо спрогнозувати відхилення форми деталі під час обробки.

Граничні допуски на розміри робочих частин лопаток турбін у тангенціальному напрямку до основи (рисунок 3.1, а) при довжинах робочих частин до 100 мм (включно), знаходяться в межах $a_{\text{root}} = \pm 0,2$ мм у першому перерізі і $a_{\text{tip}} = \pm 0,3$ мм в останньому контрольованому перерізі.

Технічні параметри обробки:

- частота, n : 5593 об/хв;
- подача, V_f : 7736,42 мм/хв (129 мм/с);
- швидкість, V_c : 121,7 м/хв;
- подача на зуб, f_z : 0,3458 мм;
- осьова глибина різання, a_p : 2 мм;
- радіальна глибина різання, a_e : 0,3 мм.

Наведені технічні параметри обробки однакові як для технології бічного фрезерування (стандартний режим), так і для оптимізованого методу гідродинамічної підтримки (режим обтікання). Також незмінними є параметри інструменту. У такий спосіб, виконане оцінювання отриманих показників з однаковими вхідними параметрами.

Для проведення МСЕ аналізу Abaqus виділяється як потужний інструмент моделювання складних механічних процесів. Проте, моделювання процесів різання, з великими часовими та обчислювальними витратами у поєднанні зі складністю моделювання динамічного видалення матеріалу вимагають застосування певних стратегічних підходу. Стратегічно доцільно попереднє моделювання на обмеженому фрагменті (рисунок 3.2) з малим часом кроку (Step Time period), перш ніж виконувати повноформатне моделювання процесу.

Одна з основних проблем моделювання процесів різання полягає у динамічному характері видалення матеріалу. Взаємодія між різальним

інструментом і заготовкою включає безліч факторів, таких як сили різання, тертя між контактними поверхнями, особливості матеріальних моделей, температура в зоні обробки та режими різання. Складність цих взаємодій є великою обчислювальною задачею.

Попереднє моделювання стає необхідним, якщо брати до уваги складну природу динамічного процесу видалення матеріалу. Різкі зміни сил, температур і умов контакту під час різання вимагають розуміння процесу, що лежить в основах фізики. Спроби оминати ці аспекти переважно призводить до загального збільшення часу обчислень та підвищеного ризику недосягання збіжності.

Обчислювальні витрати, пов'язані з моделюванням процесів різання МСЕ, можуть бути досить значними через нелінійність поведінки матеріалів та необхідність врахування термомеханічних явищ. Тож уточнення, перевірка та калібрування моделі в локальних моделях меншого масштабу заощаджує обчислювальні ресурси та дозволяє доцільніше досліджувати параметри, що впливають на процес. Поетапне ускладнення моделі дозволяє своєчасно виявляти та усувати недоліки математичного опису, перевіряти прийняті припущення та оцінювати чутливість результатів до зміни вхідних даних. Ці умови сприяють можливості точно налаштовувати моделі, перевіряти припущення та оптимізувати параметри в контрольованому форматі.

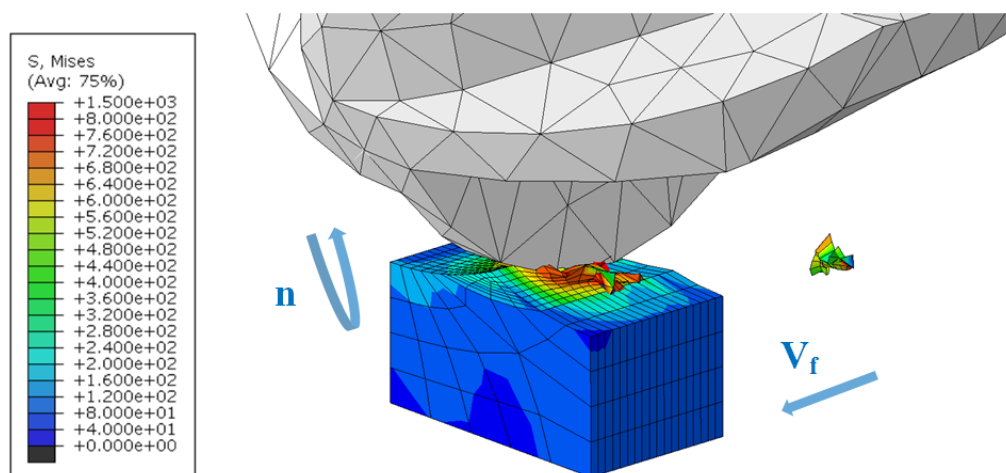


Рисунок 3.2 – Моделювання різання фрагмента зразка із застосуванням моделей пластичності та руйнування у ВШФ

Проведена верифікація підтвердила адекватність обраних підходів до опису контактної взаємодії, матеріальних моделей і граничних умов. Отримані результати стали підґрунтям для переходу до повномасштабного моделювання процесу обробки лопатки, що забезпечує більш повне відтворення її геометричних особливостей. Відповідно до поставлених завдань чисельного дослідження була розроблена спеціальна скінченно-елементна модель заготовки та сформована сітка скінченних елементів (рисунок 3.3). Параметри сітки обиралися таким чином, щоб забезпечити коректний опис напружено-деформованого стану в зоні різання, а також достатню точність відтворення геометрії лопатки. Особлива увага приділялася локальному згущенню сітки в областях контакту інструмента із заготовкою, де спостерігаються максимальні градієнти напружень, деформацій та температур. Геометрична модель заготовки була створена відповідно до технічних вимог аналізу та враховувала припуск на механічну обробку.

Моделювання різання передбачає поділ геометрії на дрібніші частини не тільки для підвищення щільності сітки в області зняття припуску, а також для застосуванні різних типів елементів для кожної частини. Вибір типів елементів залежить від особливостей геометрії. Загальні застосовані типи елементів включають гексагональні (Hex), тетроїдальні (Tet) елементи, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Перші застосовані переважно до геометрії деталі, другі до складної геометрії фрези.

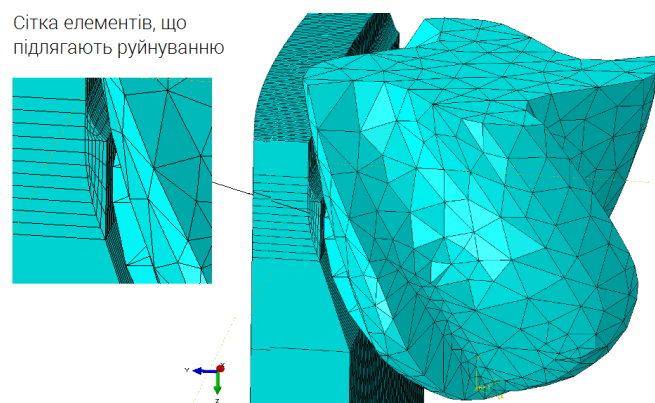


Рисунок 3.3 – Сітка МСЕ фрези та області обробки

Після завдання властивостей матеріалу, застосування граничних умов та швидкостей, у результаті аналізу отримані поля напружено-деформованого стану в зоні обробки.

Показники напружено-деформованого стану, силові показники, зумовлені, факторами геометрії оброблюваного припуску. За технології бічного фрезерування, залишковий припуск (рисунок 3.4) після попереднього проходу являє плоску 1 і радіальну 2 поверхні, забезпечений попереднім проходом бічною кромкою фрези та її радіусом. Врізання відбувається в області плоскої поверхні, що викликає відповідний максимальний динамічний опір в напрямку мінімальної жорсткості деталі.

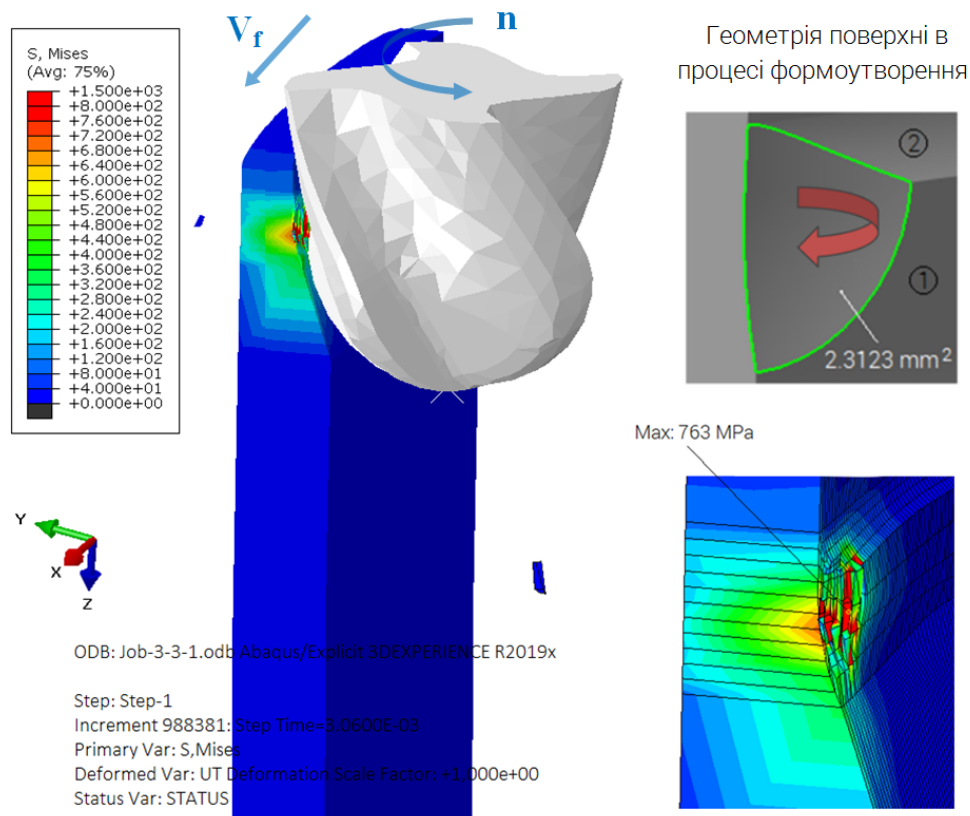
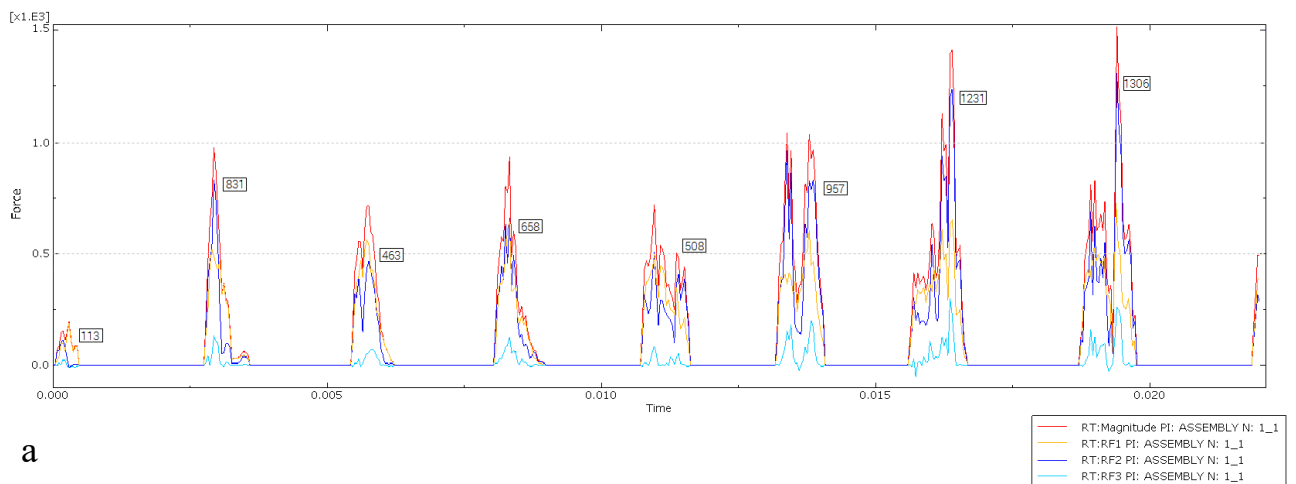


Рисунок 3.4 – Поля напружено-деформованого стану та геометрія поверхні в зоні обробки

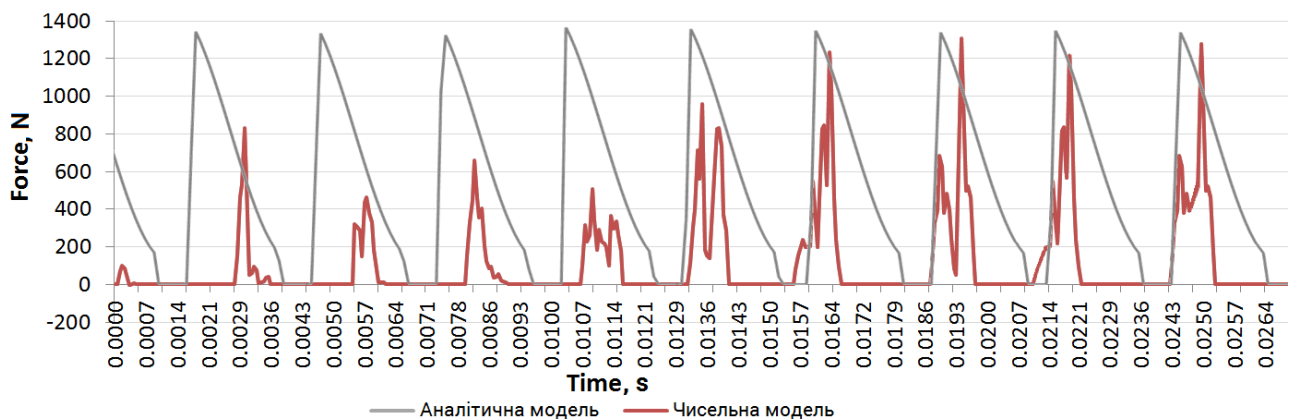
Сили різання є одними з основних характеристик процесу різання. Значення й закономірності зміни сил різання визначають необхідну потужність

металорізальних верстатів, використовуються при розрахунках на міцність і окремих її елементів, пристосувань і ріжучих інструментів. Впливають на точність і якість обробки, оскільки, можуть спричиняти деформацію інструменту і деталі, а також впливати на процеси збурення вібрацій [81-85].

Моделювання показників виконано відносно системи координат деталі малої жорсткості. У такий спосіб, отримані реакції сил RF_x , RF_y , RF_z , які відображають насамперед силовий вплив у власній системі координат деталі. Розглянуто показники не тільки сумарної реакції сили різання на інструмент, а й безпосередньо складової RF_y , яка максимально впливає на пружну деформацію деталі малої жорсткості в процесі обробки.



а



б

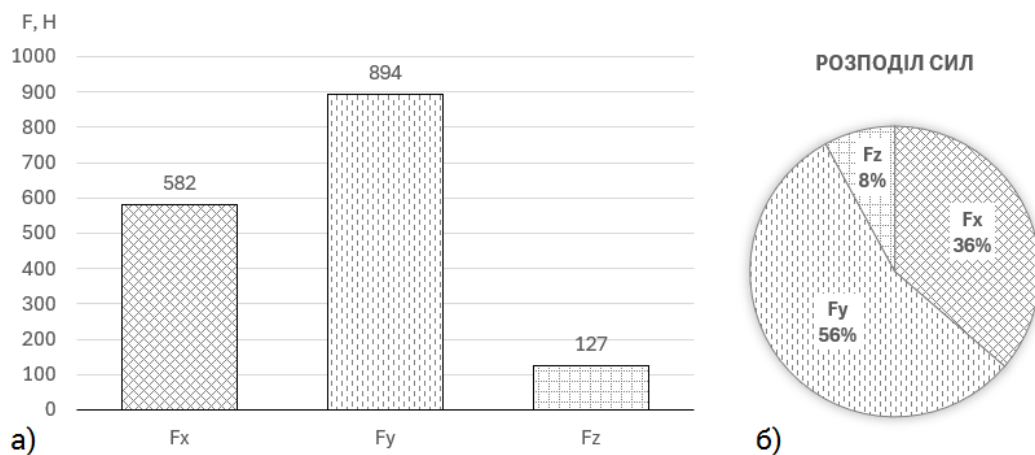
а – вивід величин реакцій сил у системі Abaqus;

б – компонента сили різання F_y визначена аналітичною та чисельною моделлю.

Рисунок 3.5 – Сили різання визначені за аналітичної та чисельної моделей

Проведено моделювання впродовж часу за який фреза виконує 2,5 оберти, Step Time period складає 0,0264 с (рисунок 3.5). Наведені максимальні значення складової R_{Fy} (рисунок 3.5, а). Спостерігається десять сплесків показнику сили різання, кожний з яких відповідає врізання та виходу зуба фрези з матеріалу. На початковій стадії видалення припуску, за аналізу компонента сили різання F_y (рисунок 3.5, б), спостерігаються розбіжності в екстремумах за аналітичної та чисельної моделей, що зумовлено обмеженнями аналітичної моделі відображати початкові етапи врізання з малою кількістю видаленого матеріалу. Подальші незначні відхилення можуть бути пов'язані зі спрощеним урахуванням геометрії інструменту, а також впливом факторів тертя. Відносна похибка аналітичної моделі за повної глибини різання у порівнянні з чисельною становить 6,4%. У таблиці 3.3 наведено значення показників отриманих у результаті моделювання.

На рисунку 3.6 показано, що за наведених режимів питомою складовою сили різання є F_y , що діє у напрямку малої жорсткості деталі і спричиняє максимальний динамічний відгук.



а – медіанні значення компонентів сили різання, Н;

б – розподіл значень сил, %.

Рисунок 3.6 – Значення реакцій сил за моделювання в залежності від напрямку дії сили.

Визначення оптимальних режимів різання інструментами зі складною геометричною формою за допомогою лише відомих аналітичних моделей і методів температурного аналізу, практично неможливо без значних припущень, а проведення експериментальних досліджень пов'язано з великими витратами часу [81]. За таких умов попереднє розв'язання задачі може бути виконано шляхом моделювання робочого процесу за допомогою МСЕ.

У даному дослідженні температурний аналіз проведено для оцінки адекватності обраних режимів різання загалом, та визначення ступеню температурного впливу на зразок деталі малої жорсткості. Аналіз температурних полів дозволяє оцінити також ефективність відведення тепла із зони різання та визначити потенційні ризики локального перегріву інструмента або оброблюваного матеріалу. Отримані результати наведені у таблиці 3.3 і використовуються для перевірки загальній відповідності умов різання експлуатаційним можливостям устаткування та для забезпечення стабільності технологічного процесу. На рисунку 3.7 показано результати розрахунку температурного поля в системі “інструмент-стружка-заготовка”.

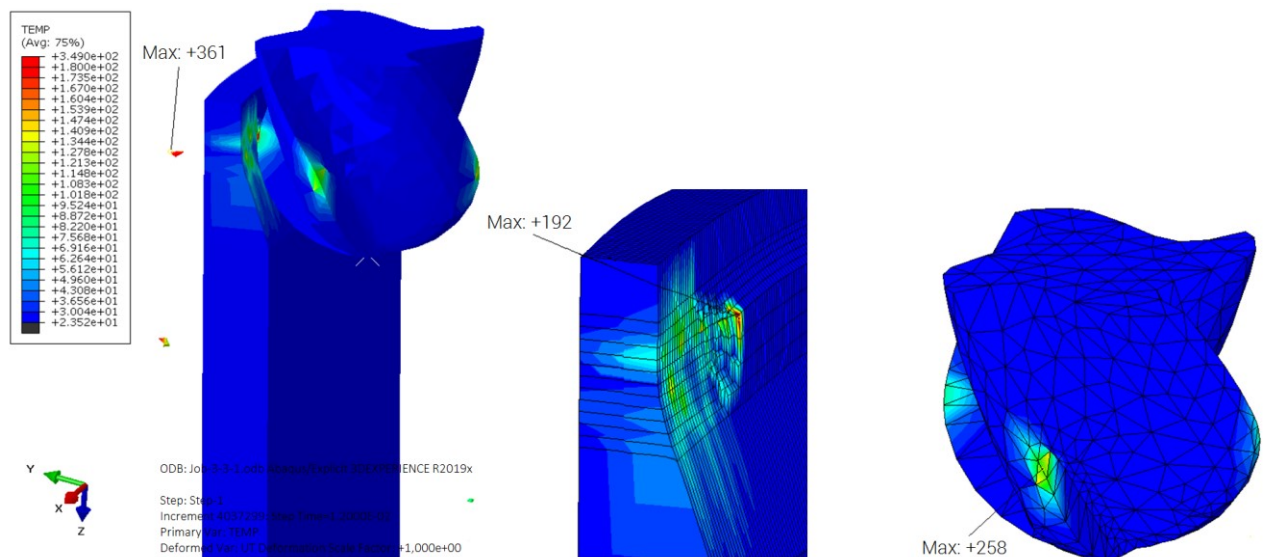


Рисунок 3.7 – Температурні поля в зоні обробки.

Максимальні температури спостерігаються в зоні контакту стружки з передньою поверхнею фрези, що відповідає ділянці найбільш інтенсивної

пластичної деформації матеріалу через тертя і сягають близько 361 °С для стружки. Водночас температура поверхні заготовки є істотно нижчою і не перевищує приблизно 192 °С, а в об'ємі деталі швидко зменшується зі збільшенням відстані від зони різання. Тобто, розподіл температурних полів має локалізований, переважно поверхневий характер, а нагрів не поширюється на всю товщину оброблюваного елемента. Така картина розподілу температур є характерною для процесів високошвидкісного фрезерування, коли значна частина теплової енергії відводиться разом зі стружкою. На окремій області моделі інструменту максимальна температура становить близько 258 °С, що вказує на суттєву роль як основного носія тепла в наведеній системі.

Порівняння температурних рівнів інструмента, стружки та заготовки показує, що основна частина теплоти концентрується в зоні стружкоутворення та ефективно відводиться із зони обробки, зменшуючи теплове навантаження на деталь. З огляду на невелику глибину проникнення тепла в матеріал заготовки та переважний вплив силових факторів на поведінку конструкції, температурні деформації в даному дослідженні розглядаються як другорядний чинник порівняно з пружними переміщеннями, викликаними дією сил різання. Отримані результати підтверджують, що за обраних режимів обробки тепловий вплив не є визначальним фактором формування похибок деталі малої жорсткості та не призводить до критичного перегріву інструмента чи заготовки.

Таблиця 3.3 – Значення показників отриманих у результаті моделювання

Показник	Час кроку, с							
	6,е-4	0,003	0,005	0,008	0,011	0,014	0,017	0,021
RF _x , N	193,1	518,6	559,0	643,4	499,4	605,2	650,7	722,1
RF _y , N	113,4	831,0	463,8	658,1	508,1	957,0	1231	1306
RF _z , N	26,00	128,1	74,00	127,0	85,03	200,9	300,0	262,2
Stress, МПа	548,3	551,2	680,0	703,0	711,6	747,5	755,9	763,4
Темп., °С	29	36	88	120	96	141	155	193

3.4 Вплив стратегії фрезерування з перекриттям проходів на ступінь відхилення та мікрогеометрію поверхні

Геометрична похибка обробки деталей малої жорсткості має складну природу та формується як результат динамічної складової, зумовленої коливальними процесами, і статичної складової, пов'язаної з пружними деформаціями та умовами формоутворення. Це обумовлює доцільність застосування підходу, заснованого на їх декомпозиції та цілеспрямованому керуванні кожною складовою з використанням відповідних технологічних засобів. Застосування стратегії повного перекриття проходів розглядається як засіб непрямого фізичного впливу для зниження статичної складової відхилення та поліпшення якісних характеристик поверхні (рисунк 3.7), що є актуальною задачею забезпечення необхідних показників мікрогеометрії поверхні.

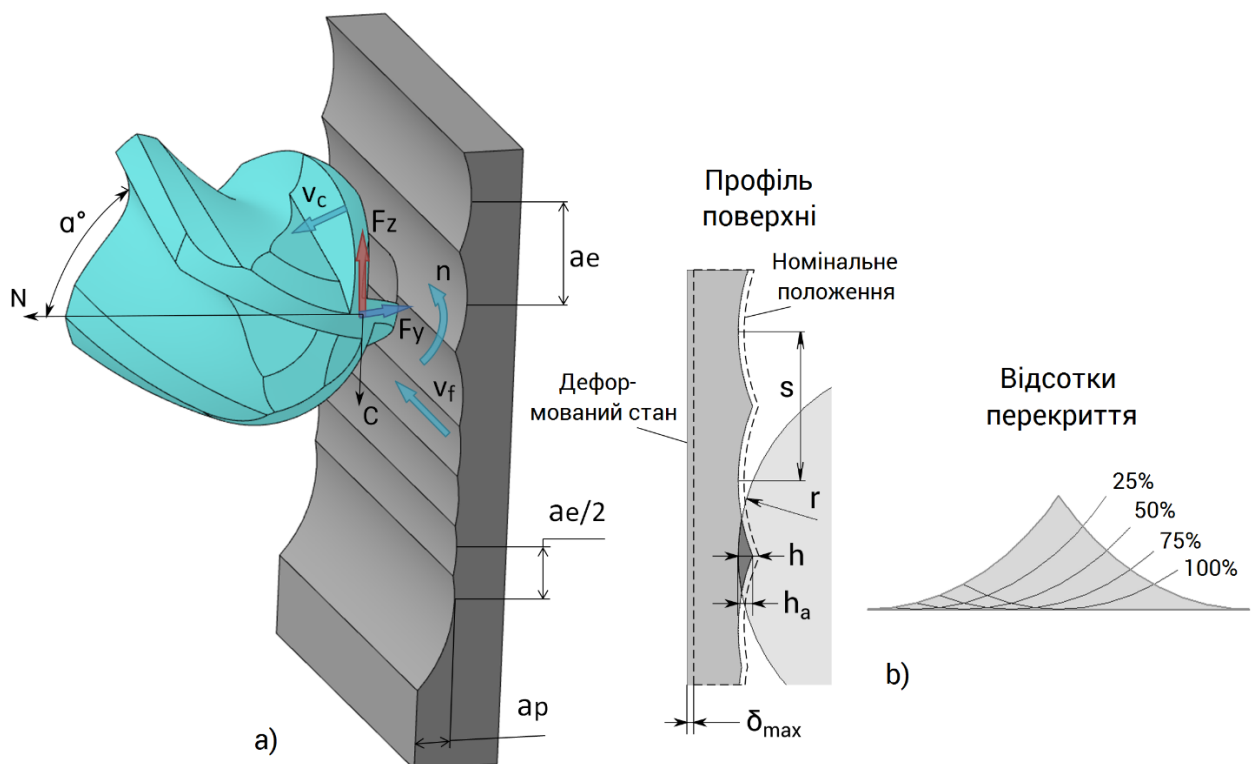


Рисунок 3.7 – Стратегія фрезерування з перекриттям проходів деталей малої жорсткості

Загально поширені підходи до зниження похибок включають переважно зміну інструменту, режимів різання або застосування додаткових пристроїв, проте додатковий потенціал мають методи непрямого впливу [84]. Фрезерування з перекриттям проходів впливає як на силову взаємодію, так і на формування мікрорельєфу поверхні. У наукових дослідженнях стратегія переважно розглядається для деталей з умовно абсолютною жорсткістю, де вплив пружних деформацій на формування поверхні є незначним. Для деталей малої жорсткості, поведінка яких визначається суттєвими пружними відхиленнями під дією сил різання, відповідні дослідження є поодинокими та не відображають вплив за різних відсотків перекриття (рисунки 3.7, б).

Сутність стратегії полягає у виконанні повторного проходу інструмента зі зміщенням на частку кроку попередньої траєкторії у такий спосіб, щоб різання відбувалося по вершинах сформованих міжпрохідних гребінців. При повному перекритті траєкторія проходить із кроком, що становить половину початкового, що забезпечує максимальну обробку попередньо сформованого рельєфу поверхні.

Ключовою особливістю даного підходу є зміна умов занурення ріжучої кромки в матеріал і, відповідно, перерозподіл складових сили різання. На відміну від традиційного фрезерування, де значна складова сили діє у напрямку мінімальної жорсткості стінки, при перекритті основний вплив зміщується у напрямку максимальної жорсткості. Це досягається за рахунок орієнтації процесу обробки вздовж стінки та геометрії контакту інструмента з міжпрохідними гребінцями. У результаті зменшується горизонтальна складова сили, що безпосередньо відповідає за відхилення тонкостінної деталі, а отже й зменшується величина пружної деформації.

Формування мікроегеометрії поверхні при такій стратегії безпосередньо пов'язане з геометрією залишкових гребінців, висота h яких визначається радіусом фрези r та кроком між проходами s . Через вплив пружних деформацій деталі фактична висота нерівностей під обробку є меншою за номінальну, оскільки під дією сил різання відбувається часткове небажане зменшення

глибини різання. У роботі запропоновано враховувати максимальне відхилення деталі для визначення дійсної висоти гребінця, що дозволяє більш точно оцінити параметри шорсткості.

Щоб встановити залежність між висотою гребінців h та шорсткістю поверхні Ra , можна використати комбінацію відповідних рівнянь за припущень щодо профілю поверхні. Висота гребінця h задається як функція радіуса фрези $r = (s^2 + 4h^2)/8h$ та відстані між проходами $s = 2\sqrt{h(2r-h)}$. Фактична висота гребінця при сферичному фрезеруванні зазвичай менша за номінальну через відхилення деталі малої жорсткості у процесі механічної обробки. Оскільки сили різання діють на деталь, це, в свою чергу, зменшує ефективну глибину різання. Відповідно, відхилення більш виражені у деталях з меншою жорсткістю, що призводить до більш значної розбіжності між номінальною h та фактичною висотою гребінця h_a . Фактична h_a отримується шляхом віднімання пікового значення відхилення δ_{max} , що може бути визначено чисельними методами і залежить від коефіцієнта перекриття λ , який складає значення від 0 до 1, що відповідає 0-100%. Відповідно, фактична висота гребінця h_a може бути виражена як різниця номінальної висоти h та відхилення δ_{max} :

$$h_a = r - 0.5 \cdot \sqrt{4r^2 - (s \cdot (1 - 0.5\lambda))^2} - \delta_{max}(\lambda). \quad (3.5)$$

Мікропрофіль поверхні при фрезеруванні сферичною фрезою може бути апроксимований періодичною синусоїдальною функцією, з амплітудою, пропорційною висоті залишкового гребінця h_a . Відповідно, параметр середньої арифметичної шорсткості Ra визначається інтегральною оцінкою відхилень профілю в межах одного кроку s . Хвилясті піки та западини є профілем поверхні. Довжина lr , на якій розраховується шорсткість, відповідає одному періоду хвилястого профілю s . Такий підхід дозволяє встановити аналітичний зв'язок між параметрами траєкторії, геометрією інструмента та показниками мікрогеометрії поверхні. Фактичне значення Ra , що враховує відхилення поверхні, обумовлене висотою фактичного гребінця може бути виражене як:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx = \frac{1}{s} \cdot \int_0^s \left| \frac{h - \delta_{\max}(\lambda)}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{s}\right) \right| dx. \quad (3.6)$$

Результати чисельного моделювання (рисунок 3.8, таблиця 3.4) відображають що, зі збільшенням ступеня перекриття проходів спостерігається суттєве зменшення шорсткості поверхні. При зміні ступеня перекриття від 25% до 100% значення Ra змінюється з 50 мкм до 3 мкм, що свідчить про ефективне згладжування мікрорельєфу за рахунок максимального зрізання гребінців.

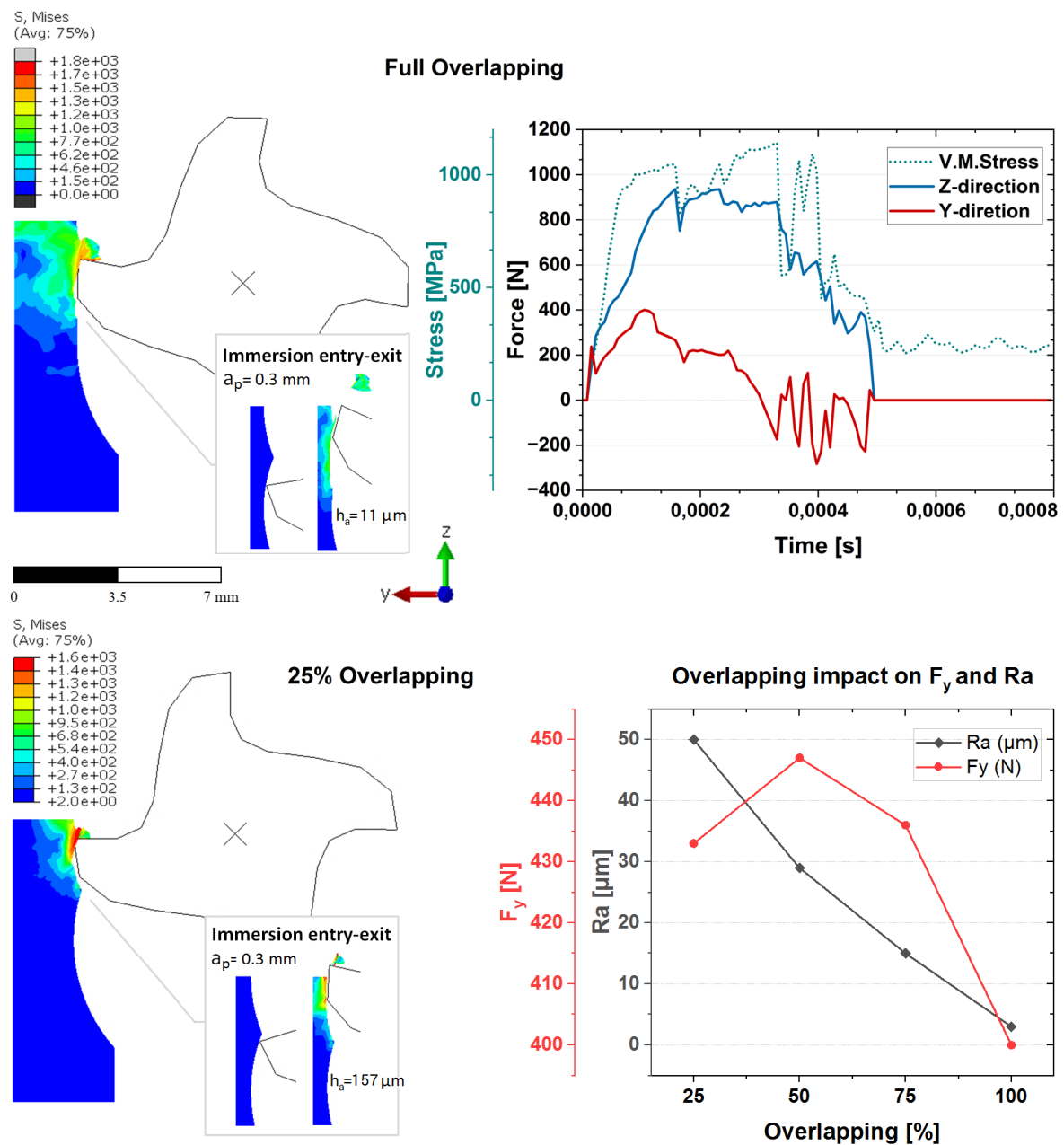


Рисунок 3.8 – Моделювання процесу фрезерування за різних ступенів перекриття проходів

Таблиця 3.4 – Значення показників чисельного моделювання різання

Перекриття	F_y , N	F_z , N	σ_v , МПа	δ_{max} , mm	h_a , μm	Ra , μm
25%	433	752	805	0.064	157	50
50%	447	1035	1016	0.068	93	29
75%	436	1119	985	0.065	46	15
100%	400	935	1143	0.060	11	3

Одночасно, спостерігається нелінійна зміна складових сили різання: за менших відсотків перекриття можливе зростання горизонтальної складової через особливості занурення інструмента, проте при повному перекритті вона зменшується, що позитивно впливає на стабільність процесу та точність обробки. У порівнянні, перехід від половини кроку до повного перекриття дозволив зменшити максимальне відхилення деталі δ_{max} на 11,76%, та більшою мірою наблизити геометрію поверхні до номінальних значень.

Фрезерування з перекриттям проходів можна розглядати як додатковий ефективний метод непрямого фізичного впливу на якість поверхні деталей малої жорсткості. У результаті часткового накладання сусідніх траєкторій руху інструмента, нерівності, сформовані під час попереднього проходу, частково зрізаються або згладжуються наступним проходом. Застосування стратегії забезпечує одночасне зниження шорсткості та стабілізацію силових параметрів процесу за рахунок раціонального формування геометрії контакту інструмента з оброблюваною поверхнею. Для деталей малої жорсткості це має особливе значення, оскільки зниження динамічних навантажень дозволяє зменшити пружні деформації заготовки, які є однією з основних причин виникнення похибок форми та розмірів. Відповідно, підвищення геометричної точності, якості поверхневого шару дає змогу покращити експлуатаційні характеристики деталей без залучення додаткового технологічного оснащення та без істотної зміни режимів різання.

3.5 Моделювання впливу гідродинамічної підтримки на точність деталі малої жорсткості

Метод згладженої гідродинаміки частинок (SPH) використовується для моделювання руху рідин. Метод SPH особливо підходить для сценаріїв, що характеризуються складною динамікою меж, особливо у випадку вільно поточними поверхневою поведінкою із значними відхиленнями меж у просторі. Обчислювальна ефективність методу SPH на одиницю елемента менша, ніж у сіткових методів на одиницю скінченного методу, особливо в тих випадках, коли метрикою є щільність елементів. Цей метод підвищує обчислювальну ефективність та сприяє точному моделюванню поведінки рідини в сценаріях зі складною взаємодією меж. Кожна частинка в методі SPH має свою масу та швидкість, і вони переміщуються в просторі відповідно до законів гідродинаміки. Це дозволяє відтворювати реалістичну поведінку рідини. Метод SPH дає змогу апроксимувати різні властивості рідини, такі як густину, тиск і в'язкість. Це робить його ефективним для моделювання різноманітних гідродинамічних явищ.

У методі SPH використовуються функції гладких ядер для оцінки значень властивостей в будь-якій точці простору на основі значень в навколишніх точках. Це дозволяє враховувати взаємодію між частинками в рідині. Метод знаходить застосування в різних галузях, включаючи гідродинаміку, астрофізику, віртуальну реальність та інженерію. Метод дає змогу досліджувати складні гідродинамічні явища та отримувати числові рішення для різних задач.

Схема симуляції SPH в сутності є методом інтерполяції. Кожна частинка несе атрибути, включаючи масу, положення, швидкість і т. д. (рисунки 3.9). Неперервне поле руху розподіляється у вигляді великої кількості рухомих частинок рідини. Фізичні атрибути частинки мають вагу в підсумовуванні її сусідами. Результат інтерполяції A_i частинки i в позиції x_i формується за участю всіх частинок j в околиці, з вагою W , пов'язаним з позицією:

$$A_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} A_j W_{ij}, \quad (3.7)$$

де m – маса, що є константою; $W_{ij}=W(x_i-x_j,h)$ є гладкою функцією однорідного ядра з опорним радіусом h .

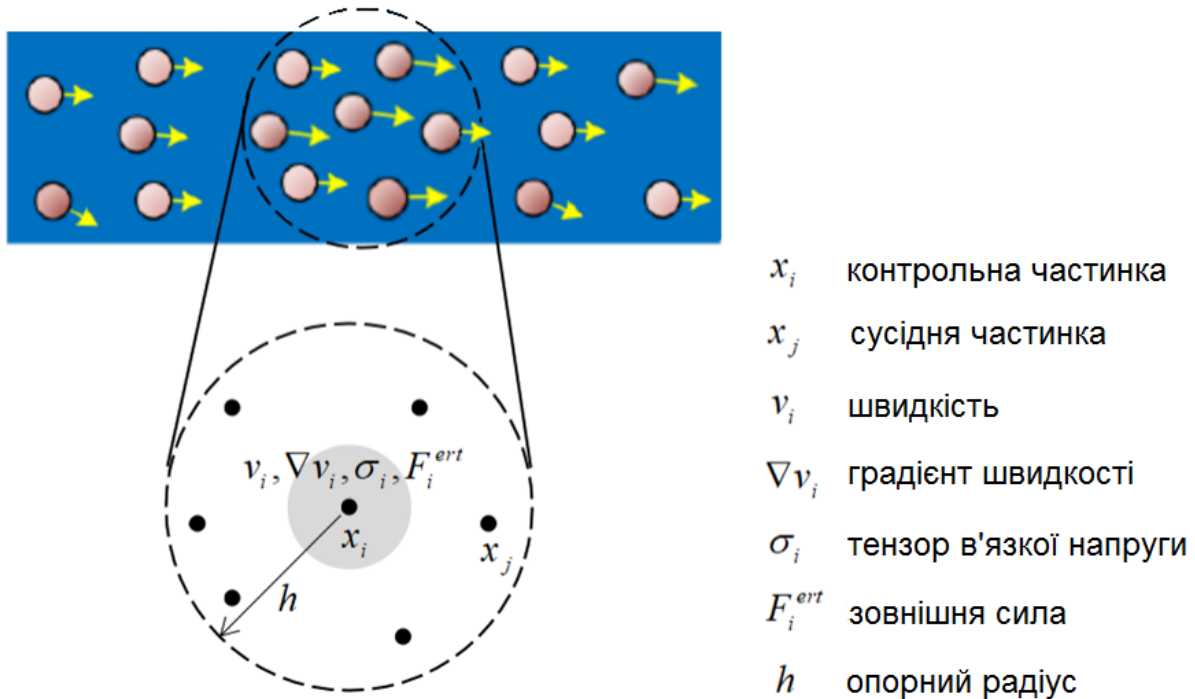
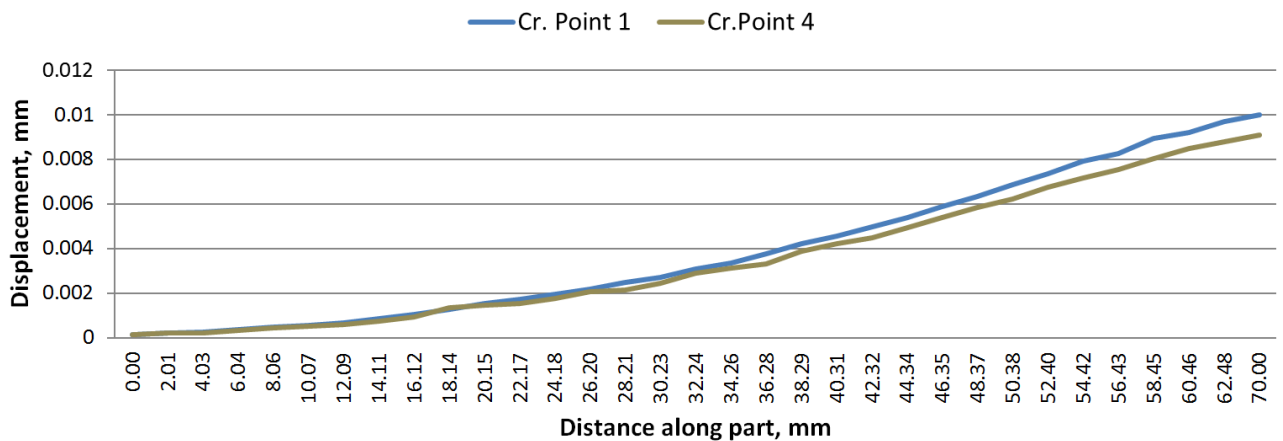
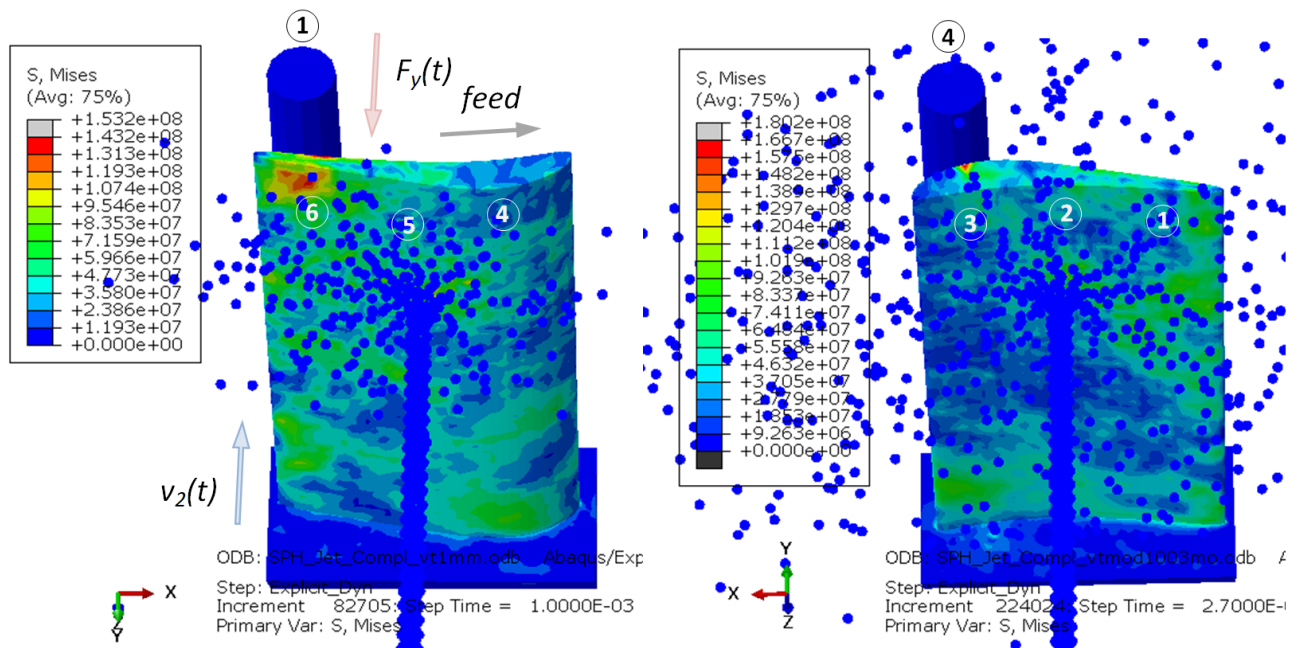


Рисунок 3.9 – Метод на основі симетричних гідродинамічних згладжених частинок (SPH) [99]

Наведено шість варіантів моделювання (рисунки 3.10, 3.11, 3.12), відповідно до характерних (критичних) точок, із застосуванням гідродинамічної підтримки струменем на зовнішній (опуклій) та на внутрішній (увігнутій) поверхні лопатки. Спрямована статична складова сили різання діє на поверхню послідовно від однієї точки до іншої уздовж напрямку подачі. Обчислена швидкість струменю для позиції інструмента у кожній характерній точці відповідає завданій умові точності (2.24). Для аналізу результатів наведено пари кривих відхилення стінки деталі, від основи до вільного кінця, у розбіжних позиціях інструмента, відповідно до точок: 1-4, 2-5, 3-6.

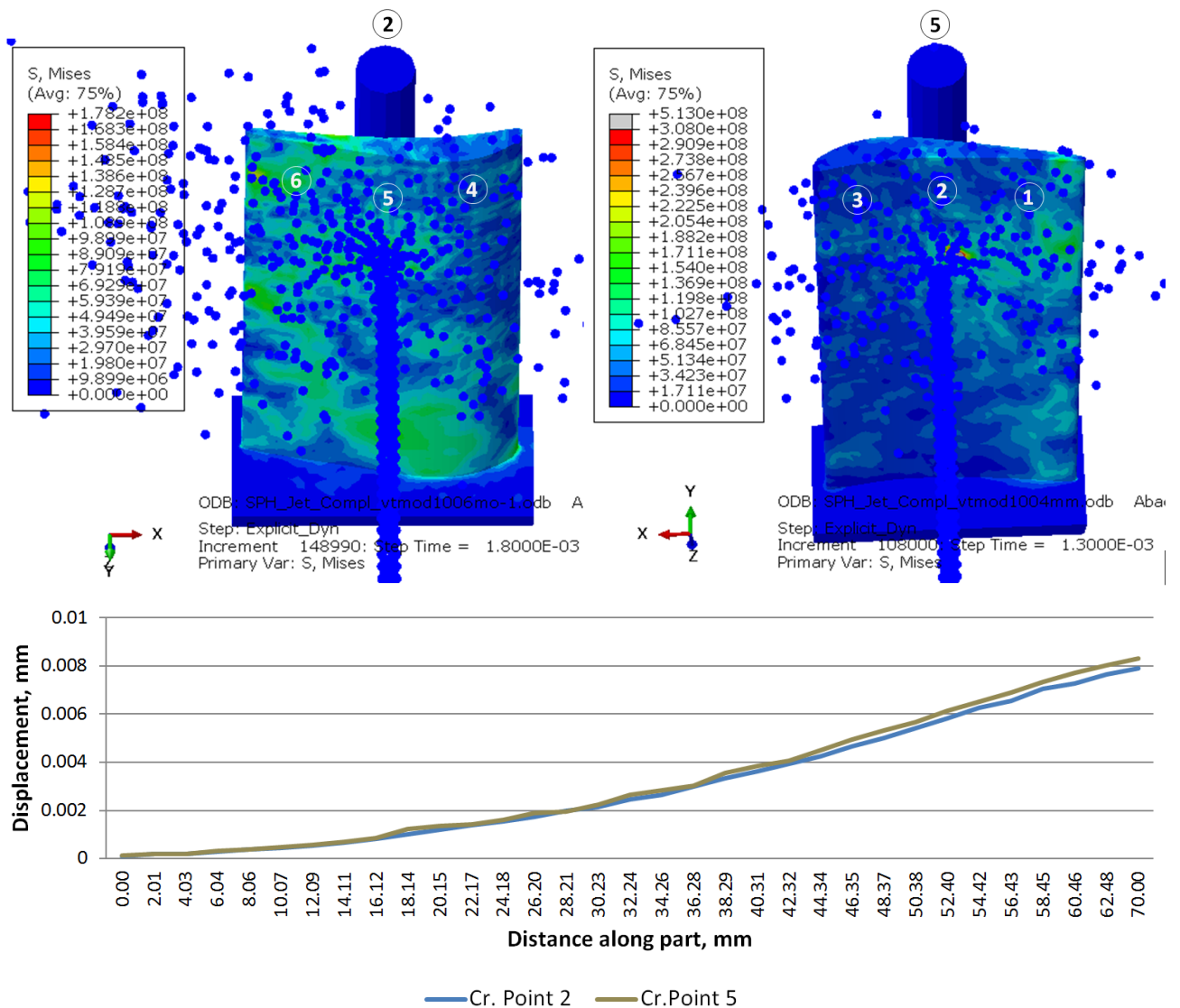


а – швидкість струменю $v_2 = 50$ м/с; б – швидкість струменю $v_2 = 36$ м/с

Рисунок 3.10 – Моделювання впливу гідродинамічної підтримки на характерні точки 1 та 4 деталі із відповідними швидкостями струменю

Таблиця 3.4 – Показники відхилень отримані у результаті моделювання підтримки деталі у точках 1 та 4

Точка	Довжина стінки деталі малої жорсткості, мм								
	7.77	15.55	23.33	31.11	38.89	46.67	54.45	62.23	70.00
	Відхилення, мм								
1	1.35E-04	4.74E-04	8.54E-04	1.74E-03	2.71E-03	4.22E-03	5.90E-03	7.94E-03	1.00E-02
4	1.31E-04	4.30E-04	7.59E-04	1.54E-03	2.44E-03	3.89E-03	4.96E-03	6.75E-03	9.11E-03

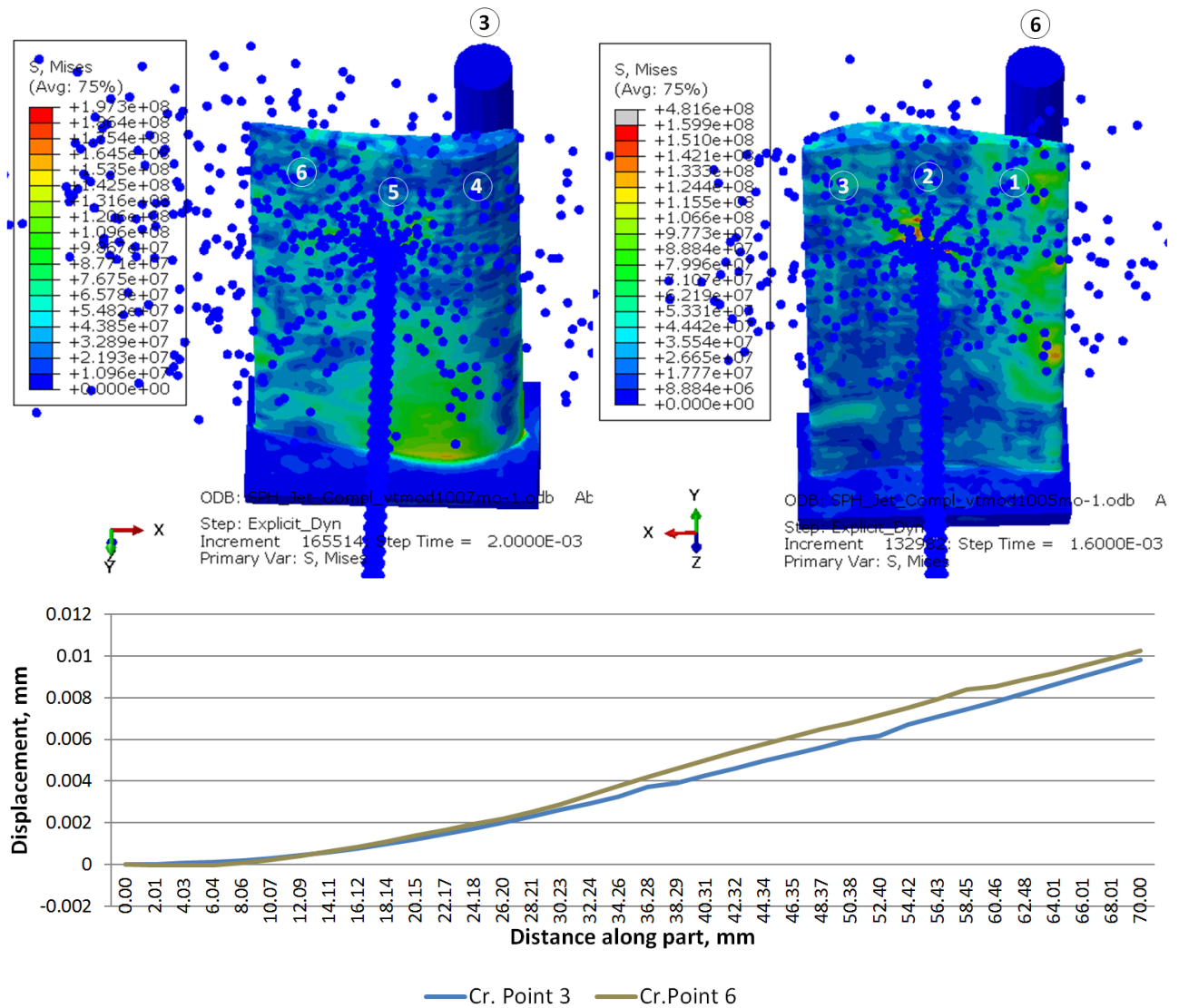


а – швидкість струменю $v_2 = 34$ м/с; б – швидкість струменю $v_2 = 41$ м/с

Рисунок 3.11 – Моделювання впливу гідродинамічної підтримки на характерні точки 2 та 5 деталі із відповідними швидкостями струменю

Таблиця 3.5 – Показники відхилень отримані у результаті моделювання підтримки деталі у точках 2 та 5

Точка	Довжина стінки деталі малої жорсткості, мм								
	7.77	15.55	23.33	31.11	38.89	46.67	54.45	62.23	70.00
	Відхилення, мм								
2	1.06E-04	2.86E-04	6.74E-04	1.37E-03	2.14E-03	3.33E-03	4.66E-03	6.26E-03	7.90E-03
5	1.20E-04	3.06E-04	6.91E-04	1.41E-03	2.22E-03	3.55E-03	4.93E-03	6.53E-03	8.02E-03



а – швидкість струменю $v_2 = 29$ м/с; б – швидкість струменю $v_2 = 58$ м/с

Рисунок 3.12 – Моделювання впливу гідродинамічної підтримки на характерні точки 3 та 6 деталі із відповідними швидкостями струменю

Таблиця 3.6 – Показники відхилень отримані у результаті моделювання підтримки деталі у точках 3 та 6

Точка	Довжина стінки деталі малої жорсткості, мм								
	7.77	15.55	23.33	31.11	38.89	46.67	54.45	62.23	70.00
	Відхилення, мм								
3	1.14E-04	6.00E-04	1.46E-03	2.62E-03	3.93E-03	5.30E-03	6.71E-03	8.22E-03	9.80E-03
6	2.40E-06	6.18E-04	1.65E-03	2.83E-03	4.60E-03	6.15E-03	7.53E-03	8.85E-03	1.03E-02

Моделювання гідродинамічної підтримки показало, що варіювання швидкості потоку дає змогу отримати значення відхилень для різних характерних точок силової дії інструменту у вузькому діапазоні значень, від найменшого 7,9 мкм у другій точці до найбільшого 10,3 мкм у шостій. Це, у свою чергу, дозволяє вирівняти загальну похибку для критичних точок за різних положень інструменту. Величини відхилень відповідають допустимій похибці (таблиця 1.2) при довжинах робочих частин осьових лопаток турбін до 100 мм (включно), що дорівнює $\pm 0,3$ мм в останньому контрольованому перерізі.

Моделювання безпосередньо струменя рідини у системі Abaqus відбувалося імпортуванням геометрії струменя, як твердотільної 3D моделі. Після налаштування параметрів струменя, виду рідини, створення сітки MCE, твердотільні елементи у вхідному файлі видаляються, крім вузлів, які потім стають SPH-частинками, тип масових елементів міняється на елементи PC3D частинок.

Характеристика обтікання струменем рідини поверхонь стінок різної геометричної форми може бути складною і залежати від різних факторів, у тому числі від форми стінки, швидкості струменя рідини та властивостей рідини. Силowy вплив потоку на стінку визначається взаємодією рідини з поверхнею. Коли струмінь рідини взаємодіє з поверхнею, він може зазнавати різних типів ударів. Струмінь може прилипнути до стінки, розтікаючись по її поверхні, або відскочити в залежності від швидкості і кута удару.

Геометрична форма стінки відіграє важливу роль у визначенні характеристик потоку. Наприклад, опукла поверхня може призвести до більшого розбризкування струменя рідини, а увігнута поверхня сфокусувати і утримувати потік, відповідно збільшується й ефективність тиску на поверхню. Кривизна впливає на розподіл тиску і призводить до зміни сили дії струменя, як це можна побачити з обтікання поверхні зовнішньої (опуклої) так і внутрішньої (увігнутої) частини, що наведено на рисунку 3.13. Тому

моделювання дії струменя SPH методом дозволяє врахувати особливості геометрії, на відміну від простого накладення обчисленої спрямованої сили на вузли сітки МСЕ.

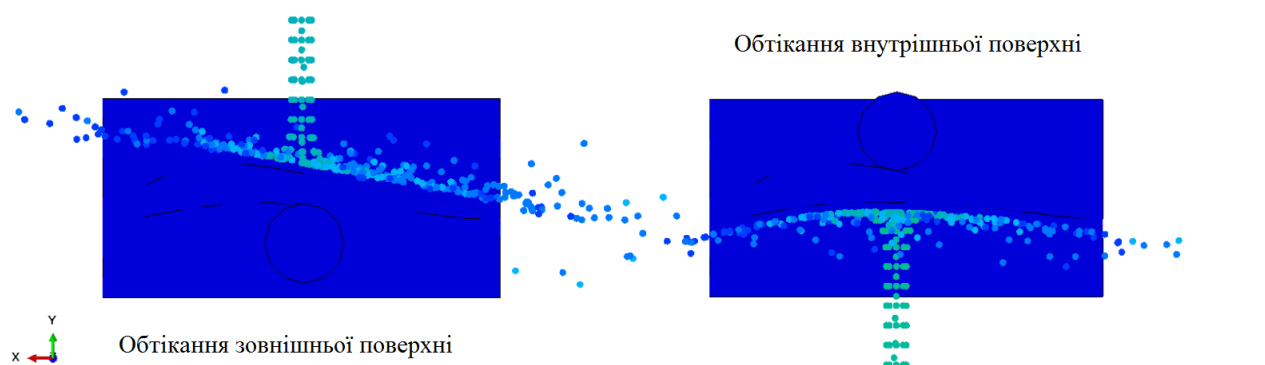


Рисунок 3.13 – Обтікання зовнішньої і внутрішньої поверхні деталі

Наступним фактором впливу є формування прикордонного шару, коли рідина тече вздовж стінки. Це тонкий шар рідини, що прилягає до стінки, де швидкість рідини зменшується до нуля. Товщина прикордонного шару залежить від таких факторів, як в'язкість рідини та швидкість струменя. Також, потік може відокремитися від стінки у певних точках, створюючи області рециркуляції. Рідина може знову прилипнути до стінки далі за течією, на це явище також впливає геометрія поверхні.

Так само, форма стінки впливає на розподіл тиску вздовж її поверхні. Градієнти тиску діють на потік і можуть призвести до додаткової дії сил на стінку. Кривизна поверхні сприяє зміні цих градієнтів тиску. Залежно від умов потоку, взаємодія струменя рідини зі стінкою може призвести до утворення вихорів та турбулентності. Турбулентність також може впливати дію сил на поверхню. Шорсткість поверхні безпосередньо впливає на потік, змінюючи прикордонний шар та сприяючи турбулентності. Це, своєю чергою, впливає на силу потоку на поверхні. Тому, варто зазначити, відсутність урахування частини наведених факторів, як шорсткість, турбулентність, формування прикордонного шару, впливає на очікувану ефективність при реалізації технології.

3.6 Модальний та гармонічний аналіз відгуку пружної системи деталі малої жорсткості за гідродинамічної підтримки

В багатьох роботах автори пропонують аналітичні та обчислювальні моделі дослідження та вирішення проблеми динамічних похибок при обробці деталей малої жорсткості [103, 104, 105, 106, 107].

У процесі фрезерування деталей часто виникають значні вібрації, здебільшого, обумовлені малою жорсткістю деталі і періодичним збуренням коливальними силами, що виникають в процесі фрезерування, це призводить до дефектів оброблених поверхонь. Дефекти поверхонь неминуче погіршують експлуатаційні характеристики складальних вузлів і навіть можуть призвести до їхнього руйнування, що призводить до значних економічних втрат. Таким чином, зниження вібрацій при фрезеруванні деталей має ключову роль з точки зору підвищення чистоти обробленої поверхні.

Загальна реакція пружної системи на динамічне силове збурення може бути наступна:

- коливання можуть бути затухаючими;
- система може коливатися постійно;
- амплітуда коливальних зростає.

У першому випадку за наявності демпфування амплітуда поступово зменшується до нуля. Це найбільш реалістичний сценарій для будь-якої фізичної конструкції.

У другому випадку відбуваються або вільні незгасні коливання: теоретичний випадок у консервативній системі без тертя, або вимушені коливання: система коливається з постійною амплітудою під дією зовнішнього періодичного навантаження, яке компенсує втрати енергії на тертя.

У третьому випадку відбувається втрата динамічної стійкості, і за прогресуючого зростання амплітуди відбувається резонанс. Необхідним компонентом для визначення частоти резонансу під час обробки, є власна частота деталі. Резонанс виникає у разі, якщо частота зовнішньої циклічної сили збурення збігається із власною частотою деталі. У фрезерній механічній

системі основним генератором коливань є різальний інструмент. Щоразу, коли зуб фрези врізається в матеріал, пружна система деталі піддається динамічному впливу, зміна положення тонкостінного елемента деталі у просторі залежить від власних частотних характеристик, зумовлених властивостями матеріалу та геометрією профілю.

Складна поверхня лопаток турбомашин характеризується низкою параметрів геометрії окремих перерізів. Профіль пера лопатки впливає, як на газодинамічні характеристики проточної частини загалом, так і на власну несучу здатність, опору втомі за циклічного навантаження. У разі невідповідності технічним вимогам ймовірність виникнення резонансних напружень лопаток є причиною асиметрії та коливань робочих коліс. Тому, в умовах підготовки виробництва, постає завдання аналізу геометрії реальної робочої лопатки, спираючись на теоретичні дані досліджень поведінки зразків деталей з малою жорсткістю.

На базі модального аналізу, проводиться розрахунок гармонічного відгуку системи. Будь-яке тривале циклічне навантаження викликає тривалу циклічну реакцію в структурній системі. Аналіз гармонічного відгуку дає можливість передбачити стійку динамічну поведінку конструкцій, таким чином дозволяючи перевірити, чи успішно вони подолають резонанс, втому та інші шкідливі ефекти вимушених коливань.

У класичній механіці гармонічний осцилятор є системою, яка при зміщенні з положення рівноваги зазнає відповідний силовий відгук F , пропорційний величині відхилення x , і повертається у попереднє положення під дією зворотної сили, пропорційної зміщенню:

$$F = -k \cdot x - b \cdot v, \quad (3.8)$$

де k – коефіцієнт жорсткості пружної системи;

x – величина відхилення;

b – постійна, що залежить від властивостей довкілля та параметрів об'єкта;

v – швидкість переміщення точки тіла;

bv – відображає силу демпфування.

Рівняння руху точки тіла:

$$\frac{m \cdot d^2 x}{dt^2} = F_0 \cdot \cos(\omega_{ext} t) - k \cdot x - b \cdot \frac{dx}{dt} . \quad (3.9)$$

Після досягнення стабільного стану, положення змінюється залежно:

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) , \quad (3.10)$$

де $\omega = \omega_{ext}$ – кутова частота циклічного силового збурення. Амплітуда :

$$A = \frac{F_0}{m \cdot \left((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (b \cdot \omega / m)^2 \right)^{1/2}} , \quad (3.11)$$

де $\omega_0^2 = k / m$, а ω_0 – власна частота осцилятора. Коли частота збурювальної сили наближається до власної частоти системи, а сили опору є незначними, знаменник у наведеному рівнянні істотно зменшується, що призводить до різкого зростання амплітуди коливань. Це явище є резонансом, і виникає за умови $\omega \approx \omega_0$ [102].

Модальний аналіз у роботі виконано за допомогою Ansys Workbench і налаштовано за таких параметрів: максимальна кількість мод – 6 (кожна з яких визначає тенденції до коливань деталі у різних напрямках), фіксованою поверхнею обрано хвостовик лопатки. Основними чинниками, що впливають на результати аналізу є геометричні особливості та властивості матеріалу деталі.

Обчислені результати представлені наведено на рисунку 3.14 та представлені у вигляді частотних мод: 1467, 3415, 4418, 6332, 9176, 10022 Гц. Основну увагу приділено частоті яка складає 1467 Гц. Інші резонансні частоти вищі і за наведених режимів різання не можуть бути досягнуті, адже це потребуватиме кратного підвищення частоти обертання інструмента.

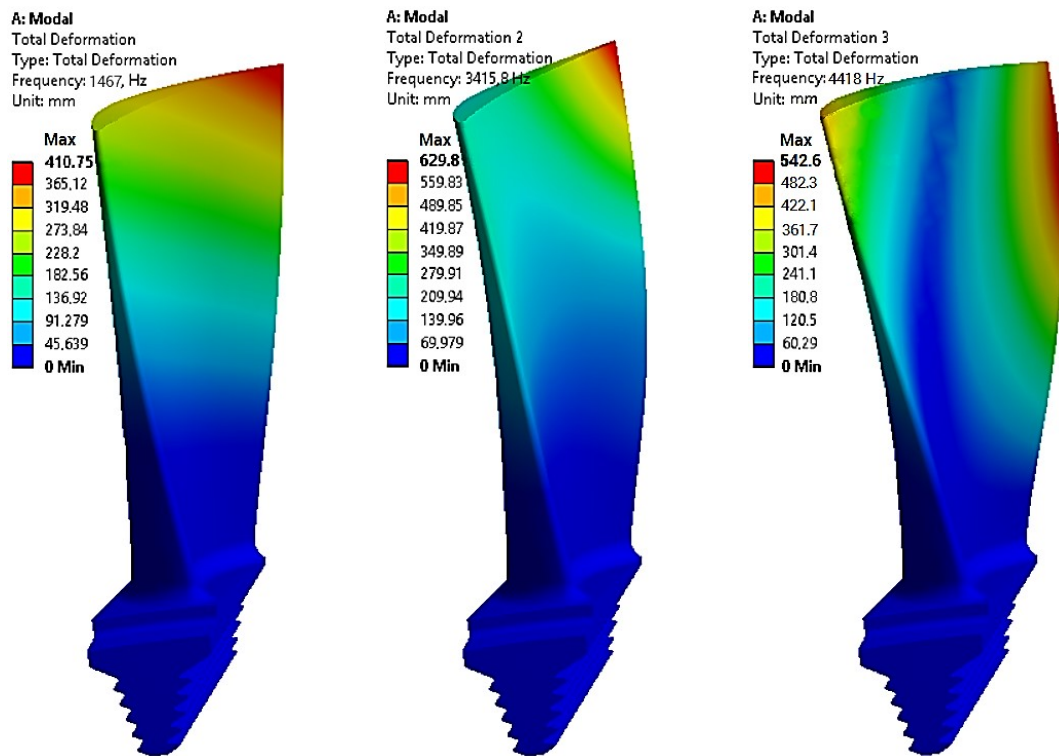


Рисунок 3.14 – Характеристика деформацій турбінної лопатки за різних частотних мод

З рисунку 3.15 показано, що найменша сукупна кумулятивна частка маси для збурення коливань, на основі отриманих власних частот, відповідає напрямку коливань Y . Цей фактор збігається з напрямком мінімальної жорсткості лопатки, що додатково відображає обрану модель відхилення.

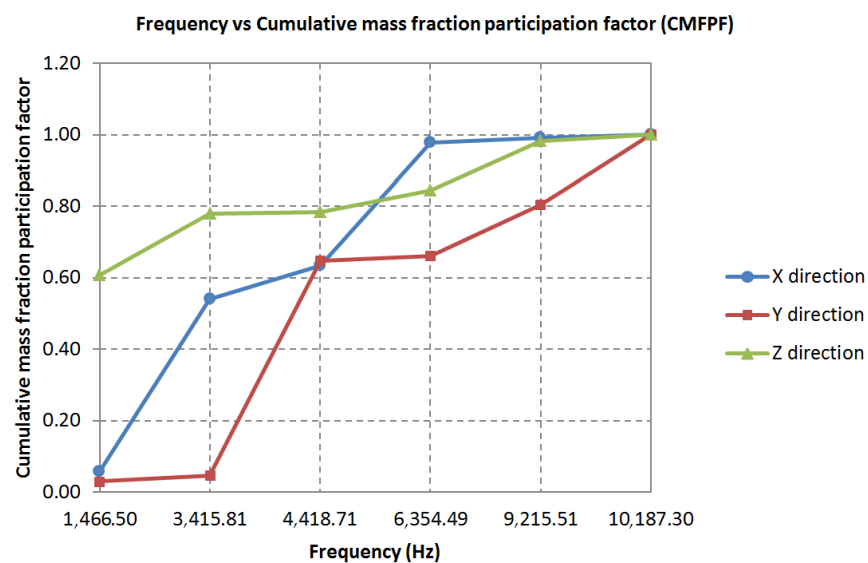


Рисунок 3.15 – Розподіл сукупної кумулятивної ефективної масової частки при збуренні коливань деталі

Взаємодію фрези та лопатки турбіни можна розглядати як механічну систему з реакцією на динамічний силовий вплив, що у небажаному випадку призводить до розходження реакції системи і відповідних резонансних явищ.

Аналіз гармонічного відгуку дає можливість прогнозувати стійку динамічну поведінку конструкцій, дозволяючи перевірити, чи успішно конструкція подолає резонанс, втому та інші шкідливі ефекти вимушених коливань. Гармонічний відгук в Ansys Workbench визначається: попереднім модальним аналізом, гармонічним частотним аналізом відгуку в діапазоні від 40 до 2800 Гц, що збудований силовим впливом в критичній точці вільного кінця деталі. За наведених режимів ВШФ застосовано 4-зубу кінцеву фрезу, з частотою обертання 5593 об/хв. Частота циклічного впливу на поверхню обчислюється як $f = n \times z / 60$. Отже, кожен зуб формує циклічний вплив на поверхню із сумарною частотою $f = 372,87$ Гц. Інші технологічні параметри моделювання: густина води – 997 кг/м³, швидкість звуку у воді – 1400 м/с, внутрішній діаметр сопла – 2 мм, зазор між соплом та деталлю – 2 мм, швидкість потоку $v_2 = 75$ м/с, характерне переміщення точки деталі $w = 0,0038$ мм. Тиск рідини $p_1 = 2,8$ МПа, за якого сила струменя дорівнює $F_J = 18$ Н (2.20), що не виходить за межі технічних можливостей існуючих промислових систем подачі МОР, робочий тиск яких становить від 2 до 7 МПа і більше, в особливості, якщо подача відбувається через інструмент.

Аналіз виконується шляхом попереднього визначення параметрів еквівалентної жорсткості $k_{eq} = 4,7 \cdot 10^3$ Н/мм (2.29) та Elastic Foundation Stiffness $k_f = 1,5 \cdot 10^3$ Н/мм³ (2.30), що визначається на основі інженерної оцінки силової взаємодії струменя з поверхнею та використовується як еквівалентна лінеаризована характеристика взаємодії струменю та конструкції у вибраній точці. При цьому параметр не розглядається як пряма фізична характеристика рідини або струменя та не передбачає оберненої відповідності між значенням жорсткості і тиском чи силою струменя – для відображення проміжних режимів слабкої, інтенсивної взаємодії (рисунок 3.16) приймається в межах $(0,5 \dots 2) k_{eq} / A$. Іншими факторами, що впливають на збільшення параметра є

ефекти гідростатичної подушки внаслідок зменшення зазору, локальне обмеження розподілу потоку, збільшення густини чи в'язкості рідини, та потенційно частоти коливань поверхні або її шорсткості.

Окрім зміни ефективної жорсткості, взаємодія струменя рідини з конструкцією призводить до дисипації енергії, що проявляється у зменшенні амплітуди коливань конструкції. Фізично це зумовлено перенесенням імпульсу рідиною, турбулентними втратами енергії в зоні розтікання струменя, дією в'язких сил у приграничному шарі, а також розбризкуванням і відривом потоку. У межах лінійного гармонічного аналізу ці ефекти враховуються через введення еквівалентного демпфування, та виражено параметром Damping Ratio в діапазоні $\zeta = 0,015 \dots 0,045$ для повітря за стандартного режиму та рідини за режимів обтікання відповідно.

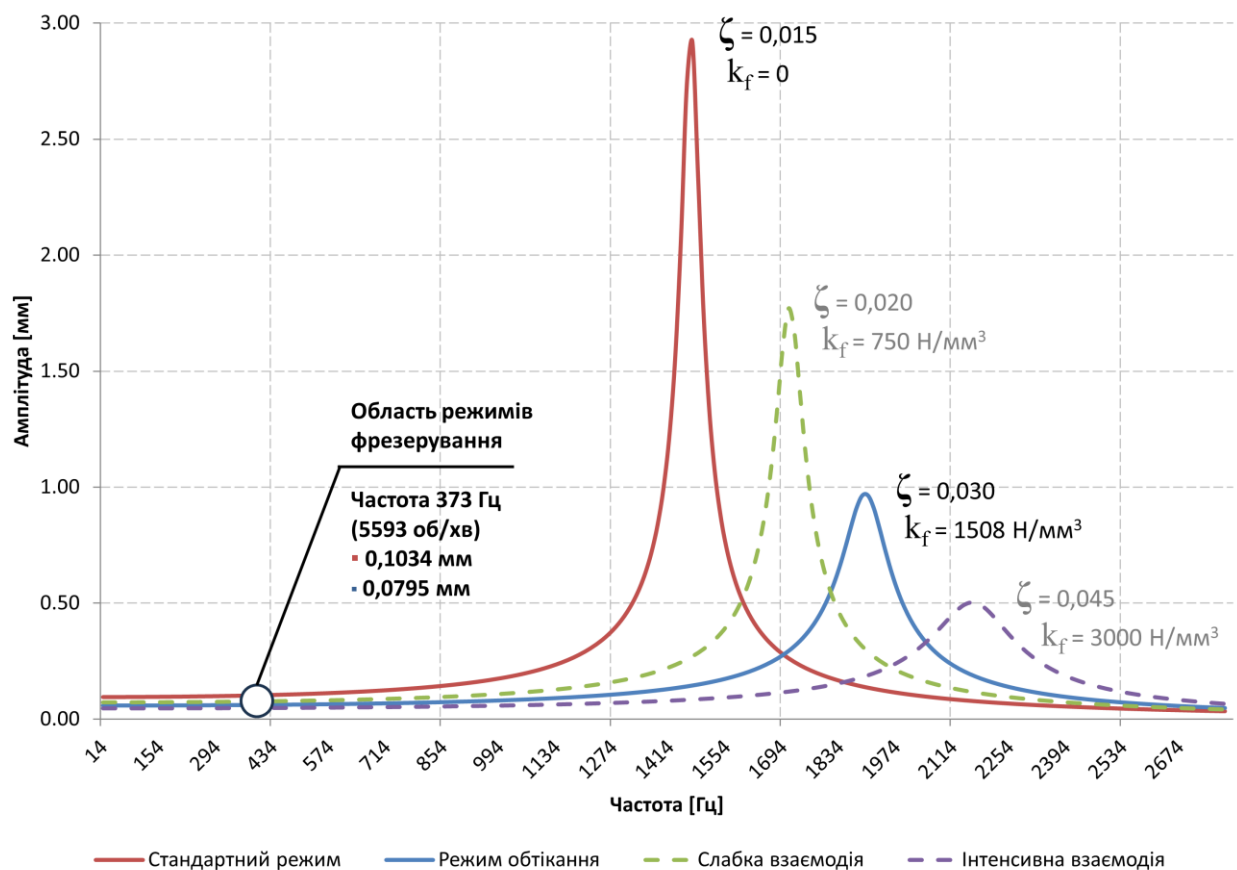


Рисунок 3.16 – Графік впливу параметрів демпфування та гідродинамічної підтримки на АЧХ деталі малої жорсткості

На обчисленому графіку наведено АЧХ вимушених коливань деталі при заданій силі збурення, що відповідає силі тиску інструменту у напрямі малої жорсткості деталі. Амплітуда коливань в області стандартного режиму фрезерування та з обтіканням складає 0,103 та 0,080 мм відповідно, що означає зниження амплітуди на 23,1%. Збіг частоти циклічного навантаження з власною частотою деталі, призводить до посилення коливань і переходу в область резонансу – для стандартних режимів амплітуда складає 2,92 мм, для режиму обтікання – 0,96 мм. Частота області фрезерування не припадає на власну частоту деталі і має значний запас для підвищення частоти обертання інструмента.

У базовому випадку $k_f = 0$, $\zeta = 0,015$ система характеризується найбільшою амплітудою коливань та найнижчою резонансною частотою. Це відповідає режиму відсутності додаткової гідродинамічної взаємодії, коли динамічна поведінка визначається виключно власною жорсткістю конструкції.

Введення еквівалентної жорсткості $k_f = 1508 \text{ Н/мм}^3$ та параметру демпфування $\zeta = 0,030$ призводить до:

- зміщення резонансної частоти у область вищих значень;
- зменшення максимальної амплітуди;
- часткового розширення резонансного піку.

Проміжні режими слабкої взаємодії зі струменем та інтенсивної взаємодії відображають визначені тенденції зміщення та пригнічення резонансного відгуку. Відповідно, узгодженість моделі виражена наступними спостереженнями:

- зростання k_f призводить до монотонного зсуву власних частот у вищу область;
- збільшення ζ призводить до зменшення амплітуди з частковою зміною форми піку АЧХ.

Висновки за розділом 3

У розділі, для порівняння характеристик CAE систем, наведено аналіз та критерії оцінки, що зведено до оціночних показників. Для моделювання складних контактних взаємодій в поєднанні з мультифізикою обрано ANSYS Workbench та Abaqus/Explicit.

Розглянуто фізико-механічні показники різання, які впливають на пружну систему деталі малої жорсткості, та відповідають за геометричну точність виготовлення.

Термомеханічні моделі розроблені в системі Abaqus. Наведено критерії пластичності та руйнування матеріалу, що є константами емпіричної моделі Джонсона-Кука. Змодельовано процеси різання, визначено ступінь напружено-деформованого стану, силові та температурні величини.

За стратегії фрезерування з перекриттям переходів досягнуто зменшення максимального статичного відхилення деталі δ_{max} на 11,76%, що більшою мірою наближає геометрію поверхні до номінальних значень.

Впровадження технології гідродинамічної підтримки дало змогу, як підтвердити переваги методу, так і встановити нові залежності, що має безпосередній вплив на пружну систему деталі малої жорсткості.

Результати моделювання гідродинамічної підтримки демонструють ефективність варіювання швидкістю струменя для досягнення величин відхилень характерних точок у вузькому діапазоні, що сприяє загальному вирівнюванню похибок за різних положень інструменту. Порівняння амплітуд коливань в області стандартного режиму фрезерування та з обтіканням, відповідає зниженню показника амплітуди на 23,1%. Отримані результати підкреслюють потенціал запропонованої технології для зменшення похибок фрезерування деталей з малою жорсткістю.

Зміст розділу відображено у таких наукових публікаціях: вплив стратегії фрезерування з перекриттям проходів на ступінь відхилення та мікрогеометрію поверхні [84], а також моделі дослідження та корекції динамічних похибок при обробці деталей малої жорсткості [104].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЇ ЖОРСТКОСТІ

4.1 Передумови програмної реалізації засобів підтримки прийняття рішень при фрезеруванні деталей малої жорсткості

З розвитком сучасної авіаційної, аерокосмічної, енергетичної промисловості зростають вимоги до виготовлення відповідальних деталей механізмів. Для того, щоби зберегти високі показники структурної міцності, високої точності поверхонь, зниження ваги вузлів, тонкостінні елементи турбомашин обробляються на високоточному багато координатному обладнанні способом видалення значного об'єму матеріалу заготовки та інтелектуально місткою підготовкою виробництва, що накладає високу економічну відповідальність.

Низька жорсткість тонкостінних елементів деталей призводить до деформації та коливань у процесі обробки, а мала товщина є критичним чинником із погляду вивільнення залишкових напружень, теплових деформацій у процесі видалення припуску. Висока кількість дефектних деталей призводить до зниження економічної ефективності виробництва загалом.

Нині, підготовка виробництва спрощується завдяки широкому застосуванню CAD/CAM/CAE систем. Проте, результати моделювання, розрахунків часто мають розрізнену форму. На етапі проєктування, для того, щоб виготовити якісну продукцію серійного виробництва, передує тривалий період випробувань, доводиться часто змінювати, коригувати параметри обробки, налаштування верстата, розроблювати різні спеціальні пристосування для установки деталі, оптимізувати траєкторію, тощо. Процес більшою мірою залежить від кваліфікації та досвіду інженерів, технологів та операторів. За браком прогнозування результатів та представлення інформації в комплексному вигляді, складно приймати правильні рішення, що є критичним

за високої вартості та складності виробництва, в особливості, елементів турбомашин.

Сучасні засоби виробництва не є ізольованими. Діджиталізація багатьох сфер виробничого процесу характеризується зростанням обсягу інформації, що генерується. Наявність відкритих рішень, з потенціалом розширення функціоналу за допомогою додаткових модулів та можливістю консолідувати та обробляти дані загалом, є необхідними та важливими в розвитку сучасної галузі.

За високої потреби підвищення економічної ефективності, продуктивності й точності, перспективним напрямом є впровадження нових засобів підготовки виробництва з використанням інтелектуальних систем вирішення інженерних завдань.

Велика увага приділяється проблемам пов'язаним з низькою жорсткістю тонкостінних елементів деталей через чутливість до таких факторів, як сила різання, сила затиску, нагрівання в процесі обробки, що призводить до проблем з якістю продукції, таких як геометрична деформація та дефекти поверхні. З огляду сучасних тенденцій, широко застосовуються засоби спостереження та контролю якості продукції в реальному часі. У дослідженні [109] запропоновано цифровий двійник для онлайн-моніторингу деформацій тонкостінних деталей під час механічної обробки. Система використовує дані від датчиків та моделі машинного навчання для прогнозування і контролю деформацій у реальному часі, що дозволяє підвищити точність та якість поверхні тонкостінних компонентів.

Для адаптації до швидких виробничих циклів та підвищення ефективності механічної обробки, існує безліч рішень для автоматизації процесу вибору параметрів обробки, але багато з них спрямовані на взаємодію з абсолютно жорсткою деталлю. У дослідженнях [108, 110], виконаних за участю автора, було проведено попередню розробку рішення з урахуванням особливостей деталей малої жорсткості. Надійність моделі статичного відхилення було підтверджено методом скінченних елементів. Проведено

моделювання ортогонального різання дослідного зразка. Розроблений інструмент виступає каркасом, з можливостями розширення і модифікації його модулів. Відповідно, основними напрямками є: удосконалення моделі процесу фрезерування зразка включенням до розрахунку складнішої геометрії; додавання нових геометричних параметрів інструменту, розширення шляхом врахування динамічної поведінки зразка, застосування ширших можливостей скриптів для керування роботи CAE середовищем.

Важливим аспектом, який необхідно врахувати при обробці, є коливання пружної системи. У процесі зняття припуску інструмент створює циклічний вплив, за збігу частоти якого з власною частотою маложорсткого елемента деталі, амплітуда коливань збільшується. У роботах за участю автора [47, 67], запропоновано попередній аналіз за допомогою інженерних засобів моделювання, як технологічне рішення для прогнозування відхилень у процесі обробки деталей малої жорсткості. Наведено технологію додаткового демпфуючого фактору, що позитивно впливає на частотні характеристики пружної системи деталі.

У роботах [111, 112] запропоновано цифровий двійник для контролю похибок обробки тонкостінних деталей, що забезпечує прогнозування деформацій та оптимізацію параметрів, а також адаптивне коригування режимів для стабілізації шорсткості поверхні.

У роботі [113] описується побудована на фізичних принципах Баєса мережа для визначення межі стійкості процесу фрезерування та параметрів системи за допомогою ітеративного тестування. У роботах [114-118] наводиться динамічна компенсація відхилень при 5-ти осьовому сферичному фрезеруванні на основі розширеного опису умов різання та метод 3D-корекції обробки лопаток моноколів. У роботі [119] наводиться онлайн система компенсації похибок обробки тонкостінних елементів деталей.

4.2 Задачі інформаційного забезпечення вибору параметрів фрезерування деталей малої жорсткості

З огляду останніх досліджень, цілісна реалізація програмного інструменту має передбачати інтеграцію в сучасне виробництво, що відповідає баченням Індустрії 4.0. На рисунку 3.15 представлено перспективну концепцію інтеграції програмного інструменту у виробниче середовище. На початкових етапах взаємодії, відбувається реалізація функціоналу аналізу CAD геометрії досліджуваної виробничої одиниці, яка стає доступною для інтегрованого CAE середовища.

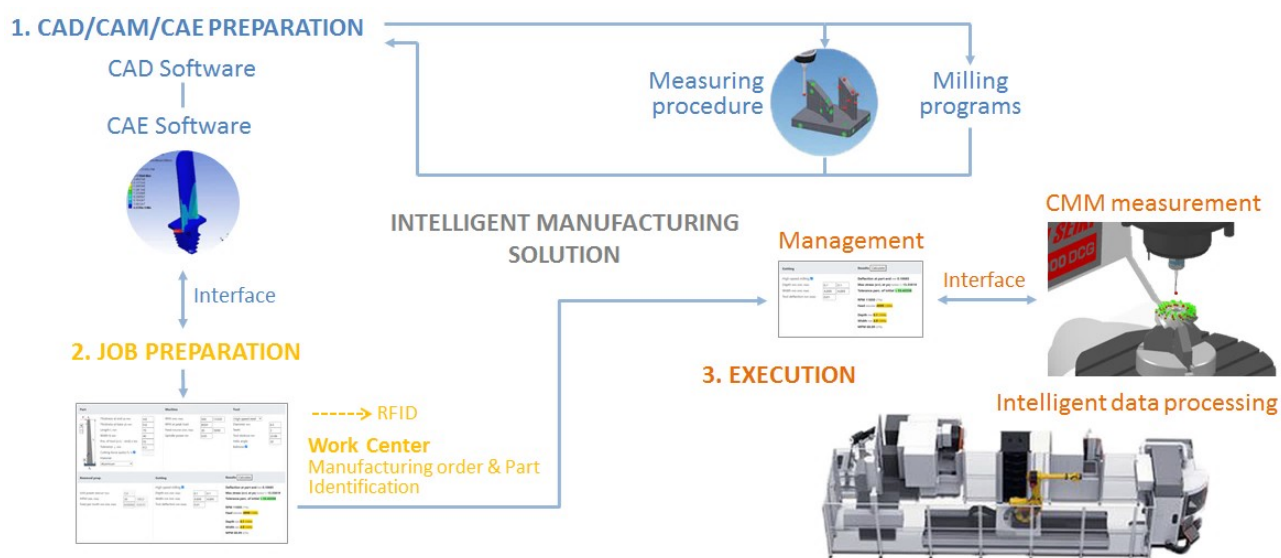


Рисунок 3.15 – Концепція інтеграції програмного інструменту у виробничий процес

На основі отриманої геометричної моделі та результатів чисельного аналізу повинні формуватися данні щодо допустимих умов реалізації технологічного процесу. Надалі аналіз має передаватися до САМ-модуля для автоматизованої генерації керуючих програм вимірювання та обробки, включно з супровідною технологічною документацією.

На етапі підготовки виробничого завдання архітектурою повинна передбачатися взаємодія з виробничими ресурсами підприємства, зокрема

засобами ідентифікації деталей, що дозволяє здійснювати простежуваність даних протягом усього життєвого циклу виробу.

Під час виконання операції система повинна підтримувати двосторонній обмін інформацією з обладнанням та засобами контролю, забезпечуючи отримання даних вимірювань, їх інтелектуальне опрацювання та коригування технологічних параметрів. Така інтеграція створює передумови для реалізації замкненого контуру керування якістю обробки деталей малої жорсткості, в якому результати вимірювань використовуються для адаптації наступних виробничих рішень та накопичення бази знань щодо особливостей виготовлення конкретних типів деталей.

Важливою задачею, в особливості для деталей малої жорсткості, є реалізація механізмів перевірки відповідності похибки відхилень вільних частин деталей, що зазнають дії виконавчих органів устаткування, за розрахованих технологічних параметрів, встановленим вимогам до точності виготовлення.

У межах даного дослідження реалізовано базовий програмний модуль вибору параметрів фрезерування та оцінювання відхилень деталей малої жорсткості, який розглядається як ядро подальшого розширення функціональності. Джерелом теоретичної бази даних табличних значень є публікації, дослідження, інженерні машинобудівні довідники [37, 120], аналітичні розрахунки та дані з аналізу МСЕ, зокрема для перевірки адекватності отриманих результатів.

4.3 Розроблення програмного інструменту для вибору параметрів фрезерування деталей малої жорсткості

Основою програмного інструменту є розроблені в роботі математичні моделі сил різання, пружного відхилення та оцінювання ефективності демпфування, що відрізняє запропонований підхід від традиційних систем вибору режимів різання, орієнтованих на абсолютно жорсткі деталі. Валідність реалізованих алгоритмів підтверджується результатами аналітичних

розрахунків та чисельного моделювання, наведених у попередніх розділах роботи.

Розроблення програмного продукту починається безпосередньо з етапу аналізу вимог, який є одним із найважливіших процесів життєвого циклу програмного забезпечення. На цьому етапі здійснюється збір, вивчення та систематизація потреб користувачів, замовників, сторін, а також визначаються основні цілі та завдання програмного продукту. Результатом аналізу є формування специфікації вимог, що містить структуровану та детально описану інформацію про функціональні можливості системи, її продуктивність, надійність, безпеку, зручність використання й інші якісні характеристики. Фіксуються конструктивні обмеження, вимоги до апаратного та програмного середовища, особливості взаємодії із зовнішніми системами, також описуються зовнішні інтерфейси користувача й програмні інтерфейси для обміну даними. За чітко визначених і документованих вимог, забезпечується повне розуміння майбутнього програмного продукту, процесу розроблення та створює основу для подальших етапів проєктування, реалізації, тестування та супроводу системи.

Наступним кроком після формування та узгодження вимог є розроблення основного алгоритму програми, який визначає логіку функціонування майбутньої системи. Алгоритм являє собою впорядковану сукупність взаємопов'язаних блоків і процедур, що виконуються у визначеній послідовності відповідно до поставлених вимог забезпечуючи досягнення необхідного результату. На цьому кроці деталізуються потоки даних, способи обробки інформації, механізми взаємодії між конкретними компонентами системи, правила прийняття рішень у різних сценаріях роботи програми. Зазначене сприяє підвищенню ефективності, надійності, масштабованості програмного продукту.

Після завершення проєктування здійснюється визначення процедури тестування та проведення випробувань програмного забезпечення, що необхідно для перевірки відповідності між реальною й очікуваною поведінкою

програми, виявлення помилок, недоліків, невідповідностей вимогам специфікації. Для цього застосовуються різні види тестування, зокрема модульне, інтеграційне, системне та приймальне тестування, що дозволяють оцінити коректність роботи окремих компонентів і системи загалом.

Завершальними кроками є системна інтеграція з супроводом програмного забезпечення. Під час інтеграції окремі модулі об'єднуються в єдину систему, налаштовується їхня взаємодія та перевіряється стабільність функціонування в реальному середовищі експлуатації. Супровід програмного продукту передбачає усунення виявлених помилок, оновлення функціональних можливостей, адаптацію до змін зовнішнього середовища з підтриманням працездатності системи протягом усього періоду її використання.

Запропонована архітектура програмного продукту представлена на рисунку 3.16.

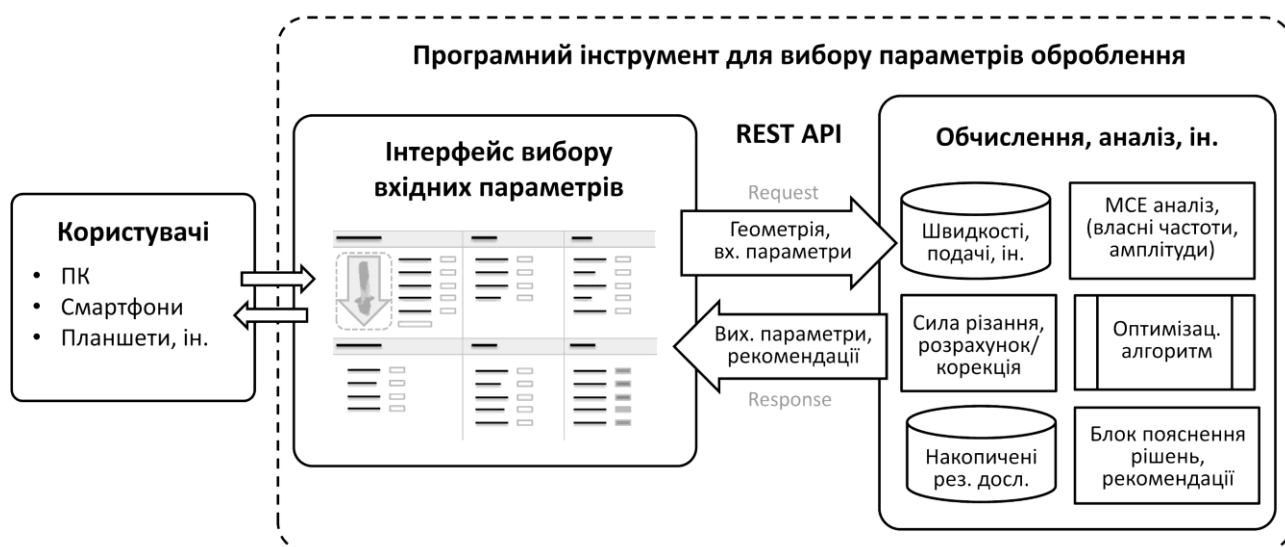


Рисунок 3.16 – Запропонована архітектура програмного інструменту для вибору параметрів фрезерування деталей малої жорсткості

Програма реалізується у форматі веб-застосунку на базі мови програмування JavaScript. Вибір зумовлений можливістю доступу до програми з будь-якої платформи, отже немає необхідності у інсталяційних файлах і достатньо пристрою з веб-браузером. Загальна блок-схема програмного алгоритму наведена на рисунку 3.17.

Програма починається зі зчитування таких параметрів, як параметри геометрії деталі малої жорсткості; технічні вимоги до точності виготовлення; матеріал; позиція інструменту та ін. Вхідні технічні параметри верстата для визначення граничних режимів: число обертів за хвилину; число обертів за хвилину за максимального навантаження; пікова потужність шпинделя; межі подачі. У аналогічний спосіб зчитуються параметри інструменту; умов різання; припуску, на основі чого проводиться розрахунок швидкостей та подач, та порівняння з відповідною моделлю та базою даних табличних значень.

Розрахунок компонентів сили різання реалізовано на основі алгоритму, наведеного у Додатку Б, який був адаптований для використання у веб-застосунку. Навантаження застосовується до обраної критичної точки деталі для перевірки відповідності допустимим значенням. Node.js виконує запис в файл силового параметру, далі трансфер до повністю налаштованого CAE середовища засобами Ansys Mechanical Scripting API, що використовує IronPython, зчитується силовий параметр і обчислюється Harmonic Response.

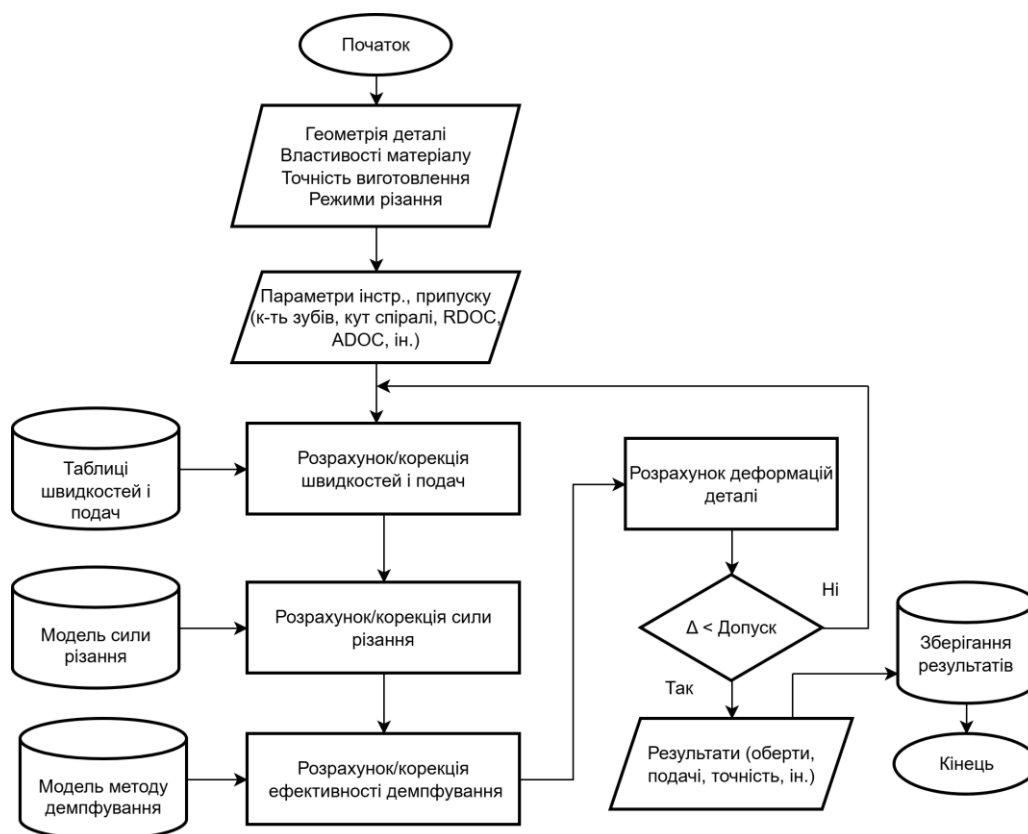


Рисунок 3.17 – Загальна блок-схема програмного алгоритму

За результатом гармонічного аналізу формується АЧХ, що складається з пар параметрів частот та амплітуд, виконується запис у .csv файл, далі, зчитування даних файлу та трансфер в інтерфейс веб-застосунку в якому вони опрацьовуються та за допомогою Chart.js будується резонансна крива АЧХ. Застосування Node.js обумовлено необхідністю в платформі виконання JavaScript як програмного коду загального значення, для роботи з файловою системою, для взаємодії з пристроями введення-виведення через відповідні API. Табличні значення, вхідні та вихідні параметри зберігаються у базі даних. Передача даних здійснюється у форматі JSON перевагою якого є швидкість передачі, малий розмір, можливість виконувати парсінг даних на стороні сервера та забезпечувати широкий діапазон сумісності з різними системами. Завдяки підвищеній сумісності це розв'язує проблему неоднорідності даних. Наявність відповідних кінцевих точок інтерфейсів для доступу до даних дає змогу розробити похідні рішення для інтеграції з іншими виробничими продуктами.

Наприкінці виконується перевірка, чи знаходиться прогнозоване відхилення у полі допуску вимог до точності. У разі виконання умови – результату буде присвоєний атрибут можливості виконання обробки, чи атрибут параметрів, що знаходяться близько свого максимуму, у супротивному випадку – атрибут необхідності внесення корекцій, дані потрапляють до бази і у блоці пояснення рішень та рекомендацій формується відповідний звіт. Під час виконання обчислень формуються лог-файли, що містять системну інформацію, необхідну для аналізу помилок функціонування системи, діагностування введених даних, протоколювання, накопичення статистичної інформації.

Загальний інтерфейс інструменту, реалізованого на момент дослідження, показано на рисунку 3.18. Робота відбувається за налаштувань: вибору оброблюваного матеріалу; допуску та завдання геометрії деталі малої жорсткості; введення технічних параметрів верстата; вибору інструментального матеріалу та його параметрів; подачі на зуб; параметрів різання (ширина,

глибина різання, відхилення інструменту). Розрахунок наводиться окремо в області результатів.

Part		Machine			
	Thickness at end y_e mm	3.75	RPM (min, max)	525	5560
	Thickness at base y_b mm	8.75	RPM at peak load	5020	
	Length L mm	70	Feed mm/min (min, max)	25.4	7737
	Width b mm	40	Spindle power kW	0.7457	
	Pos. of tool ($z=L$ - end) z mm	70			
	Tolerance \pm mm	0.3			
	Cutting force (auto) F_y N <input checked="" type="checkbox"/>				
	Material:	Steel			
Tool		Removal prop.		Cutting	
High speed steel Diameter mm: 8 Teeth: 4 Tool stickout mm: 22.86 Helix angle: 30 Ballnose <input checked="" type="checkbox"/>		Unit power (kW/cm ³)/s: 2.68 MPM (min, max): 30.48 / 76.2 Feed per tooth mm (min, max): 0.02032 / 0.1333		High-speed milling <input checked="" type="checkbox"/> Depth mm (min, max): 0.25 / 0.3 Width mm (min, max): 1.85 / 2 Tool deflection mm (max): 0.0254	
				Results <input type="button" value="Compute"/>	
				Deflection at part end mm 0.10104 Max stress ($z=L$ at y_b) N/mm ² 29.89714 Tolerance perc. of initial % 33.67940 Amplitude 0.103 (33%) Resonance Hz 1470 RPM 5535 (99%) Feed mm/min 7737 (100%) Depth mm 0.2997 (100%) Width mm 1.99 (99%) MPM 52.82 (69%)	

Рисунок 3.18 – Інтерфейс вводу-виводу основних параметрів

Розроблений програмний інструмент забезпечує автоматизовану передачу розрахованих параметрів сили різання до САЕ-середовища, запуск гармонічного аналізу та обробку отриманих результатів.

Для підвищення інформативності й наочності результатів розрахунку у програмному інструменті передбачено графічне відображення АЧХ технологічної системи із виділенням поточної робочої точки допустимої робочої області. Така візуалізація забезпечує наочне представлення взаємозв'язку між обраними режимами фрезерування та очікуваною амплітудою коливань деталі малої жорсткості. На відміну від табличного представлення результатів, оператор отримує можливість безпосередньо оцінити положення робочої точки відносно резонансної області та характер зміни динамічної відповіді системи.

Представлення результатів у вигляді АЧХ дозволяє аналізувати тенденцію зростання амплітуди коливань при зміні частоти збудження, прогнозувати рівень вібрацій для альтернативних режимів різання, у такий спосіб, з'являється можливість оцінювати запас стійкості до досягнення граничних значень амплітуди, встановлених технічними вимогами до точності обробки або якості поверхні. Також, можливо визначити, наскільки близько поточний режим знаходиться до резонансної області, та оцінити ризик виникнення небажаних динамічних явищ ще до запуску виконання технологічної операції.

При обробці деталей малої жорсткості навіть незначне наближення до резонансних частот може призвести до різкого збільшення амплітуди коливань, погіршення точності формоутворення, зростання шорсткості поверхні, підвищеного зношування інструменту. Візуальне відображення положення робочої точки на резонансній кривій дозволяє своєчасно коригувати режими різання та уникати експлуатації системи в потенційно небезпечних діапазонах, що сприяє підвищенню безпеки виконання виробничих операцій, зменшуючи ризики пошкодження дороговартісного технологічного обладнання. У реальних виробничих умовах поширеною є практика тривалого автономного виконання програм обробки без постійного контролю. За таких умов попередня оцінка положення робочої точки на АЧХ та підтвердження відсутності резонансних режимів протягом усього циклу обробки дозволяє підвищити надійність

виконання технологічного процесу, знизити ймовірність аварійних ситуацій, забезпечити стабільність досягнення заданих показників якості продукції.

Наведення графічного представлення результатів забезпечує аналіз динамічної поведінки технологічної системи та дозволяє оцінити положення робочої точки відносно резонансної області. Водночас для оперативної інтерпретації розрахованих параметрів у програмному інструменті реалізовано систему візуальних індикаторів стану параметрів, призначення яких полягає у швидкому визначенні відповідності розрахованих показників встановленим критеріям без необхідності детального аналізу кожного числового значення. Зелений колір відповідає допустимому діапазону параметрів, жовтий відображає наближення до граничних значень, червоний сигналізує про перевищення встановлених меж. У такий спосіб наведений підхід дає змогу оперативно визначати ризиковані режими фрезерування, приймаючи відповідні рішення.

Висновки за розділом 4

У межах дослідження виконано розробку програмного інструменту для визначення та контролю допустимих значень параметрів фрезерування деталей малої жорсткості. Інструмент розглядається як ядро подальшого розширення функціональності та модифікації його модулів. Відповідно, таким перспективними напрямками вдосконалення можуть бути: застосування ширшої геометричної параметризації для аналізу більш складної геометрії деталей, включення до розрахунку фрез складної геометрії, розвиток можливостей інтеграції. Вдосконалений інтегрований інструмент є перспективним програмним шаром в процесі підготовки сучасного виробництва.

Зміст розділу відображено у таких наукових публікаціях: наведено рішення для автоматизації вибору параметрів механічної обробки деталей малої жорсткості з урахуванням особливостей технологічного процесу їх виготовлення [108, 110].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення точності високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю шляхом зменшення пружних відхилень на основі керування величиною припуску та застосування допоміжної гідродинамічної підтримки поверхонь у процесі обробки.

Основні наукові та практичні результати та висновки роботи полягають у наступному:

1. Проведено комплексний аналіз особливостей виготовлення деталей з нерівномірною малою жорсткістю та встановлено основні типи таких деталей і характер технологічних деформацій за регулярністю прояву. Визначено конструктивні обмеження та граничні відхилення розмірів лопаток у тангенціальному напрямку, що є найбільш критичним з точки зору забезпечення точності формоутворення.

2. Вперше запропоновано метод допоміжної гідродинамічної підтримки деталей малої жорсткості на основі керованого обтікання поверхонь, який забезпечує зменшення пружних відхилень у процесі високошвидкісного фрезерування та може бути реалізований без необхідності суттєвої модернізації технологічного обладнання.

3. Удосконалено аналітичну модель статичного відхилення деталей з нерівномірною малою жорсткістю, завдяки врахуванню прикладання сили в довільній точці вільної частини, що забезпечує отримання теоретично обґрунтованої величини пружних деформацій уздовж поверхні.

4. Сформовано математичну модель визначення складових сили різання при бічному високошвидкісному фрезеруванні деталей малої жорсткості, що враховує особливості пружного деформування оброблюваної деталі та дозволяє оцінювати її вплив на точність обробки.

5. Удосконалено ітеративний адаптивний алгоритм оброблення деталей малої жорсткості шляхом інтеграції моделі гідродинамічної підтримки.

Алгоритм забезпечує керування інтенсивністю однокривої підтримки струменем рідини залежно від поточного положення інструмента та величини прогнозованого відхилення.

6. На основі MCE та SPH-моделювання досліджено фізико-механічні процеси в зоні високошвидкісного фрезерування. Отримано розподіли сил різання, напружено-деформованого стану та температурних полів, що підтвердили працездатність запропонованих математичних моделей.

7. Вперше встановлено, що застосування стратегії повного перекриття проходів для деталей малої жорсткості, порівняно з частковим, як засобу зниження статичної складової похибки формоутворення, забезпечує зниження статичного відхилення деталі δ_{max} на 11,76% зменшуючи шорсткість поверхні Ra від 50 до 3 мкм внаслідок згладжування міжпрохідних нерівностей.

8. Вперше встановлено закономірності зміни амплітуд вимушених коливань деталей малої жорсткості залежно від частоти обертання інструмента, кількості зубів фрези та параметрів гідродинамічної підтримки. Показано, що використання гідродинамічної підтримки на робочій частоті забезпечує зменшення амплітуди коливань на 23,1% та зміщення резонансних частот у високочастотну область, розширюючи область стійких режимів обробки.

9. Результати моделювання процесу гідродинамічної підтримки показали, що варіювання швидкості потоку дає змогу забезпечити вирівнювання статичних відхилень у критичних точках деталі у вузькому діапазоні значень від 7,9 мкм до 10,3 мкм за різних положень інструмента, що сприяє підвищенню геометричної точності обробки. Визначено основні фактори, які впливають на ефективність обтікання внутрішніх та зовнішніх поверхонь деталей малої жорсткості.

10. Розроблено програмний інструмент підтримки прийняття технологічних рішень, який реалізує запропоновані моделі та алгоритми, забезпечує визначення раціональних параметрів фрезерування і прогнозування відхилень деталей малої жорсткості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Attributes, Characteristics, and Applications of Titanium and Its Alloys. *The Minerals, Metals & Materials Society*. URL: <https://www.tms.org/pubs/journals/jom/1005/boyer-1005.html> (дата звернення: 23.03.2026).
2. Бойко І. А., Мельничук П. П. Використання титанових сплавів під час виготовлення складнопрофільних деталей авіаційних двигунів. *Технічна інженерія*. 2025. № 2(96). С. 13–21. DOI: 10.26642/ten-2025-2(96)-13-21.
3. Arnaud L., Gonzalo O., Seguy S. et al. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 54. No. 5–8. P. 479–488. DOI: 10.1007/s00170-010-2976-9.
4. EU/European Commission. CORDIS – EU research results. URL: <https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020> (дата звернення: 02.03.2026).
5. Аналітичні дані. *A Digital Science Solution*. URL: https://app.dimensions.ai/analytics/publication/overview/timeline?search_mode=content&search_text=thin-walled%20part&search_type=kws&search_field=text_search&year_from=2005&year_to=2025 (дата звернення: 12.11.2025).
6. Del Sol I., Rivero A., López De Lacalle L. N. et al. Thin-Wall Machining of Light Alloys: A Review of Models and Industrial Approaches. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 12. P. 2012. DOI: 10.3390/ma12122012.
7. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М. Удосконалення технології фрезерування деталей з нерівномірною жорсткістю. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2016. № 72. С. 105–111. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/23543>.
8. Добротворський С. С., Кононенко С. М., Басова Є. В. Технологічне забезпечення високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія:

Технології в машинобудуванні. 2018. № 6 (1282). С. 38–42. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/37173>.

9. Agarwal A., Desai K. A. Effect of Workpiece Curvature on Axial Surface Error Profile in Flat End-Milling of Thin-walled Components. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 48. P. 498–507. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.074.

10. Huang W.-W., Zhang Y., Zhang X.-Q. et al. Wall thickness error prediction and compensation in end milling of thin-plate parts. *Precision Engineering*. 2020. Vol. 66. P. 550–563. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.09.003.

11. Aijun T., Zhanqiang L. Deformations of thin-walled plate due to static end milling force. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 206. No. 1–3. P. 345–351. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.089.

12. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Kononenko, S., Dobrovolska, L., Mounif, A. S. Y.: A Special Feature of Turbine Blade Deformation During Machining. In: Ivanov V. et al. (eds.) DSMIE 2022, LNME, pp. 220–231. Springer, Cham, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-06025-0_22.

13. Maslo S., Menezes B., Kienast P. et al. Improving dynamic process stability in milling of thin-walled workpieces by optimization of spindle speed based on a linear parameter-varying model. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 93. P. 850–855. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.092.

14. Kono D., Umezu T. On-machine measurement method for dynamic stiffness of thin-walled workpieces. *Precision Engineering*. 2019. Vol. 60. P. 299–305. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.08.015.

15. Dang X.-B., Wan M., Yang Y. et al. Efficient prediction of varying dynamic characteristics in thin-wall milling using freedom and mode reduction methods. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 150. P. 202–216. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.10.009.

16. Umezu T., Kono D., Matsubara A. Evaluation of on-machine measuring method for dynamic stiffness of thin-walled workpieces. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 77. P. 34–37. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.204.

17. Shi J., Gao J., Song Q. et al. Dynamic Deformation of Thin-walled Plate with Variable Thickness under Moving Milling Force. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 58. P. 311–316. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.329.

18. Feng J., Wan M., Gao T.-Q. et al. Mechanism of process damping in milling of thin-walled workpiece. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 134. P. 1–19. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.06.001.

19. Заміховський Л. М., Іванюк Н. І., Криштопа В. С. Дослідження впливу зміни профіля лопатей газоперекачувальних агрегатів на характер коливних процесів, що генеруються ними. *Проблеми машинобудування*. 2013. Том 16. № 4. С. 23–30. URL: <https://journals.uran.ua/jme/article/view/43794>.

20. Zeng S., Wan X., Li W. et al. A novel approach to fixture design on suppressing machining vibration of flexible workpiece. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012. Vol. 58. P. 29–43. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.02.008.

21. Rubio A., Calleja L., Orive J. et al. Flexible Machining System for an Efficient Skin Machining. 2016. P. 2016-01–2129. DOI: 10.4271/2016-01-2129.

22. Bao Y., Wang B., He Z. et al. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. Vol. 35. No. 3. P. 10–26. DOI: 10.1016/j.cja.2021.01.026.

23. Universal Holding Fixture. *Canadian Metalworking*. URL: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/product/metalworking/universal-holding-fixture> (дата звернення: 15.01.2025).

24. Liu C., Hong J., Wang S. Multi-Point Positioning Method for Flexible Tooling System in Aircraft Manufacturing. . *Volume 3: Design, Materials and Manufacturing, Parts A, B, and C*. 2012. С. 113–117. DOI: 10.1115/IMECE2012-86820.

25. Wan M., Dang X.-B., Zhang W.-H. et al. Chatter suppression in the milling process of the weakly-rigid workpiece through a moving fixture. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022. Vol. 299. P. 117293. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117293.

26. Innoclamp. *The fitting Clamping System*. URL: <https://www.innoclamp.de/en-gb/blisker> (дата звернення: 05.02.2025).
27. Rigidax Fixturing Wax. *International Waxes (Rigidax®)*. URL: <https://www.internationalwaxesrigidax.com/index.html> (дата звернення: 11.06.2025).
28. Внуков Ю. М., Гермашев А. І., Мозговий А. В. Застосування технологічних середовищ при фрезеруванні тонкостінних деталей. *Запоріжжя : ЗНТУ*, 2016. С. 186.
29. ICTM Aachen – International Center for Turbomachinery Manufacturing. *Support Structures*. URL: https://www.ictm-aachen.com/en/press/20180711_support-structures-prevent-vibrations-in-post-processing-operations-for-thin-walled-parts.html (дата звернення: 03.09.2025).
30. Boegelein T., Louvis E., Dawson K. et al. Characterisation of a complex thin walled structure fabricated by selective laser melting using a ferritic oxide dispersion strengthened steel. *Materials Characterization*. 2016. Vol. 112. P. 30–40. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.11.021.
31. Boegelein T., Dryepondt S. N., Pandey A. et al. Mechanical response and deformation mechanisms of ferritic oxide dispersion strengthened steel structures produced by selective laser melting. *Acta Materialia*. 2015. Vol. 87. P. 201–215. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.12.047.
32. Glaessgen E., Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *Adaptive Structures Conference*. 2012. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
33. Zhu Z., Xi X., Xu X. et al. Digital Twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 59. P. 453–466. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.03.015.
34. Hilton K., Fitzpatrick S., Violatos I. et al. A statistics based Digital Twin for the combined consideration of heat treatment and machining for predicting distortion. *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 101. P. 93–97. DOI: 10.1016/j.procir.2021.04.003.

35. Söderberg R., Wärmeffjord K., Carlson J. S. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals*. 2017. Vol. 66. No. 1. P. 137–140. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.038.
36. Grote K.-H., Antonsson E. K. Springer Handbook of Mechanical Engineering. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-30738-9.
37. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. *Cambridge university press*. 2012. 2nd ed., p. 43.
38. Wang Z., Li X., Liu J. et al. Research on the Influence of Impeller Oblique Cutting Angles on the Performance of Double-Suction Pumps. *Energies*. 2025. Vol. 18. No. 15. P. 3907. DOI: 10.3390/en18153907.
39. Wimmer S., Hunyadi P., Zaeh M. F. A numerical approach for the prediction of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled structures. *Production Engineering*. 2019. Vol. 13. No. 3–4. P. 479–488. DOI: 10.1007/s11740-019-00901-7.
40. Li Z.-L., Tuysuz O., Zhu L.-M. et al. Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 128. P. 21–32. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.01.005.
41. Wang Z., Li H., Zhang Y. et al. A novel model reduction technique for time-varying dynamic milling process of thin-walled components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 127. No. 11–12. P. 5199–5217. DOI: 10.1007/s00170-023-11770-x.
42. Bolar G., Joshi S. N. Numerical Modeling and Experimental Validation of Machining of Low-Rigidity Thin-Wall Parts. . *Precision Product-Process Design and Optimization*. 2018. C. 99–122. DOI: 10.1007/978-981-10-8767-7_4.
43. Du Z., Zhang D., Hou H. et al. Peripheral milling force induced error compensation using analytical force model and APDL deformation calculation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 88. No. 9–12. P. 3405–3417. DOI: 10.1007/s00170-016-9052-z.

44. Ge G., Du Z., Yang J. Rapid prediction and compensation method of cutting force-induced error for thin-walled workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. No. 11–12. P. 5453–5462. DOI: 10.1007/s00170-020-05050-1.

45. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М., Трубін Д. В., Пітель Я. Розробка програмного забезпечення для розрахунку параметрів обробки деталей з малою жорсткістю методом високошвидкісного фрезерування у рамках Free Digital Space for I. 4.0 (FGS2I4.0). *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей 28-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2020. Харків, 28-30 жовт. 2020 : у 5 ч. Харків : Планета-Прінт. Ч. 1. С. 114. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/69421>.

46. Pavlenko I., Kononenko S., Czernek K. et al. An Increase in the Energy Efficiency of Axial Turbines by Ensuring Vibration Reliability of Blade Milling. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 1511. DOI: 10.3390/en16031511.

47. Kononenko S., Dobrotvorskiy S., Basova Y. et al. Simulation of Thin-Walled Parts End Milling with Fluid Jet Support. . *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. 2020. P. 380–389. DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_37.

48. Masmali M., Mathew P. An Analytical Approach for Machining Thin-walled Workpieces. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 58. P. 187–192. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.186.

49. Sun Y., Jiang S. Predictive modeling of chatter stability considering force-induced deformation effect in milling thin-walled parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 135. P. 38–52. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.08.003.

50. Li Z., Yan Q., Tang K. Multi-pass adaptive tool path generation for flank milling of thin-walled workpieces based on the deflection constraints. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 68. P. 690–705. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.075.

51. Huang N., Bi Q., Wang Y. et al. 5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2014. Vol. 84. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.04.004.
52. Zhao X., Zheng L., Shi M. et al. Unified model towards service-oriented continuous-discrete hybrid adaptive milling system for thin-walled parts driven by in-process data. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55. No. 10. P. 2156–2161. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.027.
53. Zhao X., Zheng L., Wang Y. et al. Services-oriented intelligent milling for thin-walled parts based on time-varying information model of machining system. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022. Vol. 219. P. 107125. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107125.
54. Tangestani R., Chakraborty A., Sabiston T. et al. Multi-scale model to simulate stress directionality in laser powder bed fusion: Application to thin-wall part failure. *Materials & Design*. 2023. Vol. 232. P. 112147. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112147.
55. Sulitka M., Falta J., Stejskal M. et al. Integrated force interaction simulation model for milling strategy optimization of thin-walled Blisk blade machining. *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 102. P. 174–179. DOI: 10.1016/j.procir.2021.09.030.
56. Polishetty A., Goldberg M., Littlefair G. et al. A Preliminary Assessment of Machinability of Titanium Alloy Ti 6AL 4V During thin Wall Machining Using Trochoidal Milling. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 97. P. 357–364. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.259.
57. Wan X.-J., Hua L., Wang X.-F. et al. An error control approach to tool path adjustment conforming to the deformation of thin-walled workpiece. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011. Vol. 51. No. 3. P. 221–229. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.11.007.

58. Ratchev S., Govender E., Nikov S. et al. Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143–144. P. 796–801. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00382-0.
59. Wang M.-H., Sun Y. Error prediction and compensation based on interference-free tool paths in blade milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 71. No. 5–8. P. 1309–1318. DOI: 10.1007/s00170-013-5535-3.
60. Ramanaiah B. V., Manikanta B., Ravi Sankar M. et al. Experimental Study of Deflection and Surface Roughness in Thin Wall Machining of Aluminum Alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. No. 2. P. 3745–3754. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.627.
61. Scippa A., Grossi N., Campatelli G. FEM based Cutting Velocity Selection for Thin Walled Part Machining. *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 14. P. 287–292. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.023.
62. Munoa J., Sanz-Calle M., Dombovari Z. et al. Tuneable clamping table for chatter avoidance in thin-walled part milling. *CIRP Annals*. 2020. Vol. 69. No. 1. P. 313–316. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.081.
63. Navarro P. F., Chiu P.-H., Higgins A. et al. Shear band patterning and post-critical behavior in AISI 4340 steel with different microstructure. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 112. P. 144–154. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.10.011.
64. Wang J., Ibaraki S., Matsubara A. A cutting sequence optimization algorithm to reduce the workpiece deformation in thin-wall machining. *Precision Engineering*. 2017. Vol. 50. P. 506–514. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.07.006.
65. Diez E., Perez H., Marquez J. et al. Feasibility study of in-process compensation of deformations in flexible milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 94. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.03.008.
66. Dobrotvorskiy S., Basova Y., Kononenko S. et al. Numerical Deflections Analysis of Variable Low Stiffness of Thin-Walled Parts During Milling. . *Advances*

in Design, Simulation and Manufacturing II. 2020. P. 43–53. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_5.

67. Kononenko S., Dobrotvorskiy S., Basova Y. et al. Deflections and frequency analysis in the milling of thin-walled parts with variable low stiffness. *Acta Polytechnica*. 2019. 59(3). P. 283–291. DOI: 10.14311/AP.2019.59.0283.

68. Liang R., Liu W., Fu Y. et al. Physics-informed deep learning for structural dynamics under moving load. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024. Vol. 284. P. 109766. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2024.109766.

69. Tyflopoulos E., Steinert M. A Comparative Study of the Application of Different Commercial Software for Topology Optimization. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 611. DOI: 10.3390/app12020611.

70. ANSYS vs ABAQUS Structural Analysis. *Ideametrics Global Engineering*. URL: <https://ideametricsglobalengineering.com/ansys-vs-abaqus-structural-analysis-capabilities-and-industry-use-cases> (дата звернення: 11.08.2025).

71. Liu Y. ANSYS and LS-DYNA used for structural analysis. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*. 2008. Vol. 1. No. 1. P. 31. DOI: 10.1504/IJCAET.2008.021254.

72. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. High rates and high temperatures. *Roy. Inst. of Engrs in the Netherlands*. 1983. P. 541–547.

73. Johnson G. R., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. *Engng Fract. Mech.* 1985. No. 21. P. 31–48.

74. Daoud M., Jomaa W., Chatelain J. F. et al. A machining-based methodology to identify material constitutive law for finite element simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. No. 9–12. P. 2019–2033. DOI: 10.1007/s00170-014-6583-z.

75. Rodríguez-Millán M., Díaz-Álvarez J., Bernier R. et al. Thermo-Viscoplastic Behavior of Ni-Based Superalloy Haynes 282 and Its Application to

Machining Simulation. *Metals*. 2017. Vol. 7. No. 12. P. 561. DOI: 10.3390/met7120561.

76. Akram S., Jaffery S. H. I., Khan M. et al. Numerical and experimental investigation of Johnson–Cook material models for aluminum (Al 6061-T6) alloy using orthogonal machining approach. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10. No. 9. P. 168781401879779. DOI: 10.1177/1687814018797794.

77. Navarro P. F., Chiu P.-H., Higgins A. et al. Shear band patterning and post-critical behavior in AISI 4340 steel with different microstructure. *International Journal of Impact Engineering*. 2018. Vol. 112. P. 144–154. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.10.011.

78. Agmell M., Ahadi A., Ståhl J.-E. A fully coupled thermomechanical two-dimensional simulation model for orthogonal cutting: formulation and simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2011. Vol. 225. No. 10. P. 1735–1745. DOI: 10.1177/0954405411407137.

79. Akram S., Jaffery S. H. I., Khan M. та ін. A Numerical Investigation of Effects of Cutting Velocity and Feed Rate on Residual Stresses in Aluminum Alloy Al-6061. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*. 2015. Вип. 3. № 1. С. 26–30. DOI: 10.7763/IJMMM.2015.V3.160.

80. Wang Z., Zhao Y., Ma G. et al. A numerical study on the high-velocity impact behavior of pressure pipes. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2016. Vol. 17. No. 6. P. 443–453. DOI: 10.1631/jzus.A1500112.

81. Криворучко Д.В., Залога В. А. Моделювання процесів різання методом кінцевих елементів: методологічні основи. *Сумський державний університет*, 2012. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/36676>.

82. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Ivanova, M., Kotliar, A., Dobrovolska, L.: Forecasting of the productivity of parts machining by high-speed milling with the method of half-overlap. *Diagnostyka*. 19, 37–42 (2018).

83. Dobrotvorskiy S., Basova Y., Ivanova M. та ін. Forecasting of the productivity of parts machining by high-speed milling with the method of half-overlap. *Diagnostyka*. 2018. Вип. 19. № 3. С. 37–42. DOI: 10.29354/diag/93136.

84. Kononenko S., Dobrotvorskiy S., Basova Y. et al. Impact of Overlapping Method on Cutting Forces and Surface Formation in End Milling of Thin-Walled Parts. *Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems*. 2025. Vol. 1480. P. 67–78. DOI: 10.1007/978-3-031-95191-6_7.

85. Sadílek M., Čep R., Budak I. та ін. Aspects of Using Tool Axis Inclination Angle. *Strojníski vestník – Journal of Mechanical Engineering*. 2011. Вип. 57. № 09. С. 681–688. DOI: 10.5545/sv-jme.2010.205.

86. Daniyan I., Mpofu K., Ramatsetse B. et al. An abaqus-based 3D computer aided design, modelling and simulation of the end-milling operation of stainless steel 301. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 112. P. 298–303. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.001.

87. Daniyan I. A., Tlhabadira I., Daramola O. O. et al. Design and Optimization of Machining Parameters for Effective AISI P20 Removal Rate during Milling Operation. *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 84. P. 861–867. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.301.

88. Li B., Zhang S., Zhang Q. et al. Modelling of phase transformations induced by thermo-mechanical loads considering stress-strain effects in hard milling of AISI H13 steel. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 149. P. 241–253. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.10.010.

89. Chen W., Huo D., Hale J. et al. Kinematics and tool-workpiece separation analysis of vibration assisted milling. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 136. P. 169–178. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.12.037.

90. Dehmani H., Salvatore F., Hamdi H. Numerical Study of Residual Stress Induced by Multi-steps Orthogonal Cutting. *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 8. P. 299–304. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.106.

91. Ding H., Shen N., Shin Y. C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys. *Journal of Materials*

Processing Technology. 2012. Vol. 212. No. 3. P. 601–613. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.

92. Tajalli S. A., Movahhedy M. R., Akbari J. Simulation of orthogonal micro-cutting of FCC materials based on rate-dependent crystal plasticity finite element model. *Computational Materials Science*. 2014. Vol. 86. P. 79–87. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.01.016.

93. Zhang R., Wu C., Zhang Y. A novel technique to predict harmonic response of Particle-damping structure based on ANSYS® secondary development technology. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 144. P. 877–886. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.10.035.

94. Tang Q., Li C., She H. et al. Nonlinear response analysis of bolted joined cylindrical-cylindrical shell with general boundary condition. *Journal of Sound and Vibration*. 2019. Vol. 443. P. 788–803. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.12.003.

95. Fei J., Lin B., Yan S. et al. Chatter prediction for milling of flexible pocket-structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 89. No. 9–12. P. 2721–2730. DOI: 10.1007/s00170-016-9760-4.

96. Wang H., Huang L., Yao C. et al. Integrated analysis method of thin-walled turbine blade precise machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015. Vol. 16. No. 5. P. 1011–1019. DOI: 10.1007/s12541-015-0131-0.

97. Wu Q., Li D.-P., Ren L. et al. Detecting milling deformation in 7075 aluminum alloy thin-walled plates using finite difference method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 85. No. 5–8. P. 1291–1302. DOI: 10.1007/s00170-015-8012-3.

98. Ma J., Liu Z., Jia Z. et al. Stability recognition for high-speed milling of TC4 thin-walled parts with curved surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 91. No. 5–8. P. 2819–2829. DOI: 10.1007/s00170-016-9905-5.

99. Liu S., Ban X., Wang B. et al. A Symmetric Particle-Based Simulation Scheme towards Large Scale Diffuse Fluids. *Symmetry*. 2018. Vol. 10. No. 4. P. 86. DOI: 10.3390/sym10040086.

100. Bansal R.K. A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines. *Published by Laxmi Publications Pvt. Ltd.* 2010. P. 818–819.

101. Elastic Foundation Stiffness. *Official global learning and ecosystem platform*. URL: <https://innovationspace.ansys.com/knowledge/forums/topic/why-is-the-unit-of-the-elastic-foundation-stiffness-n-m3> (дата звернення: 12.02.2026).

102. The University of Tennessee. *Department of Physics and Astronomy. Damped and driven oscillations*. URL: http://labman.phys.utk.edu/phys221core/modules/m11/damped_and_driven_oscillations.html (дата звернення: 18.06.2025).

103. Bolar G., Das A., Joshi S. N. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. *Measurement*. 2018. Vol. 121. P. 190–204. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.02.015.

104. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Kharchenko, O., Trubin, D.: Adaptive Fluid Jet Support Technique for Variable Stiffness Thin-Walled Parts End Milling. In: Ivanov, V. et al. (eds.) *DSMIE 2024 Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII*, LNME, pp. 223–239. Springer, Cham, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-61797-3_19.

105. Scippa A., Grossi N., Campatelli G. FEM based Cutting Velocity Selection for Thin Walled Part Machining. *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 14. P. 287–292. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.023.

106. Ma J., Li Y., Zhang D. et al. Dynamic response prediction model of thin-wall workpiece-fixtured system with magnetorheological damping in milling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 74. P. 500–510. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.12.050.

107. Hou J., Zhao Z., Fu Y. et al. Machining stability enhancement in multi-axis milling of titanium hollow blade by introducing multiple damping and rigid

supporters. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 198–208. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.016.

108. Кононенко С. М., Добротворський С. С., Басова Є. В. та ін. Розроблення програмного рішення для вибору параметрів фрезерування тонкостінних елементів турбомашин. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*. 2022. № 1(52). С. 65–72. DOI: 10.31471/1993-9965-2022-1(52)-65-72.

109. Liu S., Lu Y., Li J. et al. Multi-scale evolution mechanism and knowledge construction of a digital twin mimic model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021. Vol. 71. P. 102123. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102123.

110. Dobrotvorskiy S., Kononenko S., Basova Y. et al. Development of Optimum Thin-Walled Parts Milling Parameters Calculation Technique. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. 2021. P. 343–352. DOI: 10.1007/978-3-030-77719-7_34.

111. Zhao W., Li R., Liu X. et al. Construction Method of Digital Twin System for Thin-Walled Workpiece Machining Error Control Based on Analysis of Machine Tool Dynamic Characteristics. *Machines*. 2023. Vol. 11. No. 6. P. 600. DOI: 10.3390/machines11060600.

112. Zhao Z., Wang S., Wang Z. et al. Surface roughness stabilization method based on digital twin-driven machining parameters self-adaption adjustment: a case study in five-axis machining. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2022. Vol. 33. No. 4. P. 943–952. DOI: 10.1007/s10845-020-01698-4.

113. Cornelius A., Karandikar J., Gomez M. et al. A Bayesian Framework for Milling Stability Prediction and Reverse Parameter Identification. *Procedia Manufacturing*. 2021. Vol. 53. P. 760–772. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.06.073.

114. Dittrich M.-A., Uhlich F. Self-optimizing compensation of surface deviations in 5-axis ball-end milling based on an enhanced description of cutting conditions. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 31. P. 224–232. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.05.013.

115. Cho M.-H., Kim D.-W., Lee C.-G. et al. CBIMS: Case-based impeller machining strategy support system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2009. Vol. 25. No. 6. P. 980–988. DOI: 10.1016/j.rcim.2009.04.017.
116. Li W., Wang L., Yu G. Force-induced deformation prediction and flexible error compensation strategy in flank milling of thin-walled parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 297. P. 117258. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117258.
117. Altintas Y., Tuysuz O., Habibi M. et al. Virtual compensation of deflection errors in ball end milling of flexible blades. *CIRP Annals*. 2018. Vol. 67. No. 1. P. 365–368. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.03.001.
118. Scippa A., Sallese L., Grossi N. et al. Improved dynamic compensation for accurate cutting force measurements in milling applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 54–55. P. 314–324. DOI: 10.1016/j.ymssp.2014.08.019.
119. Wąsik M., Kolka A. Machining Accuracy Improvement by Compensation of Machine and Workpiece Deformation. *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 11. P. 2187–2194. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.365.
120. Oberg E., Jones F., Horton H., Ryffel H. Machinery's Handbook. *New York : Industrial Press*, 2012. Vol. 29. P. 1081–1091.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

Статті у наукових виданнях включених до міжнародних баз даних Scopus та/або Web of Science:

1. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Trubin, D., Talar, R.: Impact of Overlapping Method on Cutting Forces and Surface Formation in End Milling of Thin-Walled Parts. In: Pavlenko, D., et al. (eds) Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. LNME, vol 1480, pp. 67–78. Springer, Cham, 2025. (Scopus, Швейцарія, Q4).

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_7

2. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Kharchenko, O., Trubin, D.: Adaptive Fluid Jet Support Technique for Variable Stiffness Thin-Walled Parts End Milling. In: Ivanov, V. et al. (eds.) DSMIE 2024 Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII, LNME, pp. 223–239. Springer, Cham, 2024. (Scopus, Швейцарія, Q4).

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_19

3. Pavlenko, I., Kononenko, S., Czernek, K., Witczak, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Ivanov, V., Krupińska, A., Matuszak, M., Włodarczak, S., Ochowiak, M.: An Increase in the Energy Efficiency of Axial Turbines by Ensuring Vibration Reliability of Blade. Energies 2023, 16(3), 1511. (Scopus, Швейцарія, Q2).

DOI: <https://doi.org/10.3390/en16031511>

4. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Kononenko, S., Dobrovolska, L., Mounif, A. S. Y.: A Special Feature of Turbine Blade Deformation During Machining. In: Ivanov V. et al. (eds.) DSMIE 2022, LNME, pp. 220–231. Springer, Cham, 2022. (Scopus, Швейцарія, Q4).

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_22

5. Dobrotvorskiy, S., Kononenko, S., Basova, Y., Dobrovolska, L., Ivanova, M.: Development of Optimum Thin-Walled Parts Milling Parameters Calculation

Technique. In: Ivanov V. et al. (eds.) DSMIE 2021, LNME, pp. 343–352. Springer, Cham, 2021. (Scopus, Швейцарія, Q4).

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_34

6. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Dobrovolska, L., Yepifanov, V.: Simulation of Thin-walled Parts End Milling with Fluid Jet Support. In: V. Ivanov et al. (eds.) DSMIE 2020, LNME, pp. 380–389. Springer, Cham, 2020. (Scopus, Швейцарія, Q4).

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_37

7. Kononenko, S., Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Gasanov, M., Dobrovolska, L.: Deflections and Frequency Analysis in the Milling of Thin-walled Parts with Variable Low Stiffness. Acta Polytechnica 2019, 59(3), pp. 283–291. (Scopus, Чехія, Q2).

DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0283>

8. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Kononenko, S., Dobrovolska, L., Ivanova, M.: Numerical Deflections Analysis of Variable Low Stiffness of Thin-Walled Parts During Milling. In: Ivanov V. et al. (eds.) DSMIE 2019, LNME, pp. 43–53. Springer, Cham (2020). (Scopus, Швейцарія, Q4).

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_5

Статті у періодичних наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

9. Кононенко, С. М., Добротворський, С. С., Басова, Є. В., Добровольська, Л. Г. Розроблення програмного рішення для вибору параметрів фрезерування тонкостінних елементів турбомашин. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022. 1(52). С. 65–72. (Б).

DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-65-72](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-65-72)

(Наказ МОН №1643 від 28.12.2019, Б)

10. Кожушко А. П., Мітцель М. О., Карпов В. О., Кононенко С. М. Малишев С. Є. Аналіз та перспектива розвитку конструкцій трансмісійних установок ланцюгових землерийних засобів інженерно-будівельної техніки.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2025. № 1. С. 119–128. (Б).

DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2025.1.14>

(Наказ МОН №1290 від 30.11.2021, Б)

11. Добротворський С. С., Добровольська Л. Г., Кононенко С. М. Аналіз відхилень при кінцевому фрезеруванні деталей з нерівномірною малою жорсткістю. *Різання та інструмент в технологічних системах.* 2018. Вип. 89. С. 59–63. (фахове видання).

URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/40379>

(перереєстрація – Наказ МОН №409 від 17.03.2020, Б)

12. Добротворський С. С., Кононенко С. М., Басова Є. В. Технологічне забезпечення високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні.* 2018. № 6 (1282). С. 38–42. (фахове видання).

URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/37173>

(перереєстрація – Наказ МОН №320 від 07.04.2022, Б)

13. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М. Удосконалення технології фрезерування деталей з нерівномірною жорсткістю. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології.* 2016. № 72. С. 105–111. (фахове видання).

URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/23543>

(перереєстрація – Наказ МОН № 1301 від 15.10.2019, Б)

Праці, апробаційного характеру, що додатково відображають наукові результати:

14. Добротворський С. С., Кононенко С. М., Рафал Талар. Розробка технології адаптивної гідроструминної підтримки торцевого фрезерування тонкостінних деталей змінної жорсткості для їх поверхневого структурування. *Нові технології в машинобудуванні* : матеріали доповідей Всеукр. конф.,

Харків, 4–7 верес. 2024. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2024. С. 44.

URL: https://khai.edu/files/uploads/konferencii/34_materiali_konferencii_novi_tehnologii_u_masinobuduvanni_2024.pdf

15. Добротворський С. С., Кононенко С. М., Басова Є. В. Добровольська Л. Г. Інтенсифікація процесів виготовлення тонкостінних елементів турбомашин шляхом застосування цифрових сервісів та технологій. *Прогресивні технології у машинобудуванні PTME-2022* : зб. наук. пр. X Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ-Яремче, 1–5 лют. 2022. С. 80–82.

URL: https://www.masfak.ni.ac.rs/images/Konferencije_PedjaZivkovic/Zb_PT_ME2022.pdf#page=80

16. Chelabi M. A., Basova Y., Dobrotvorskiy S., Kononenko S. Contribution to the design of turbine rotor of mixed flow turbine used in a turbocharger. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали IX Всеукр. наук.-техн. конф. Суми, 19–22 квіт. 2022. Суми : Сумський державний університет, 2022. С. 33. URL: <https://conf.teset.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/04/stpv-2022.pdf>

17. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М., Трубін Д. В., Пітель Я. Розробка програмного забезпечення для розрахунку параметрів обробки деталей з малою жорсткістю методом високошвидкісного фрезерування у рамках FREE DIGITAL SPACE FOR I. 4.0 (FGS2I4.0). *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей 28-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2020. Харків, 28-30 жовт. 2020 : у 5 ч. Харків : Планета-Прінт. Ч. 1. С. 114.

URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/69421>

18. Басова Є. В., Добротворський С. С., Трубін Д. В., Кононенко С. М. Програмне та технологічне забезпечення для отримання технологічних параметрів процесу високошвидкісного фрезерування деталей змінної жорсткості з використанням методу скінчених елементів та web технологій. *Прогресивні напрямки розвитку автоматичних технологічних комплексів* : сб. тр. VII-ої МНТК, Луцьк, 28–30 трав. 2022. ЛНТУ, 2022. С. 164–165.

URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2023-02/2022_TK-2022_Збірник%20тез.pdf

19. Кононенко С. М., Басова Є. В., Добротворський С. С., Горячев А. В. Технологічні показники високошвидкісного фрезерування деталей малої жорсткості в залежності від обраної стратегії. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XXIX міжнародної наук.-практ. конф. MicroCAD–2021, Харків. 18-20 трав. 2021 : у 5 ч. Харків : Планета-Прінт. Ч. 1. С. 100.

URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/68026>

20. Кононенко С. М., Басова Є. В. Розробка методики розрахунку оптимальних параметрів багатолезвийного оброблення тонкостінних деталей. *Молодь: наука та інновації* : матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених, Дніпро, 25–27 лист. 2020. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. Т. 3. С. 5.

URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2020/Том3.pdf>

21. Кононенко С. М., Добротворський С. С., Басова Є. В., Добровольська Л. Г., Едл М. Дослідження відхилень елементів деталей малої жорсткості та технологічні засоби їх зниження у процесі кінцевого фрезерування. *Прогресивні технології в машинобудуванні* : збірник наукових праць IX-ої МНТК, Львів-Плай, 3–7 лют. 2020. Львів : Львівська політехніка, 2020. С. 102.

URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/3/2/news/4951/zbirnyktez.pdf>

22. Басова Є. В., Добротворський С. С., Кононенко С. М., Едл М., Рехор Я. Наукові основи виготовлення деталей машинобудування зі змінною жорсткістю методом високошвидкісного фрезерування з гідродинамічним обтіканням. *Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів* : сб. тр. VI-ої МНТК, Луцьк, 2–4 черв. 2020. Луцьк : Луцький національний технічний університет, 2020. С. 135–136.

URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/50433>

23. Пониделко А. А., Басова Є. В., Кононенко С. М., Добротворський С. С. Технологічні проблеми виготовлення лопаток з урахуванням їхньої змінної жорсткості. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XXVII Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2019, Харків, 15–17 трав. 2019 : у 4 ч. Харків : НТУ “ХПІ”, 2019. Ч. 1. С. 142.

URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44200>

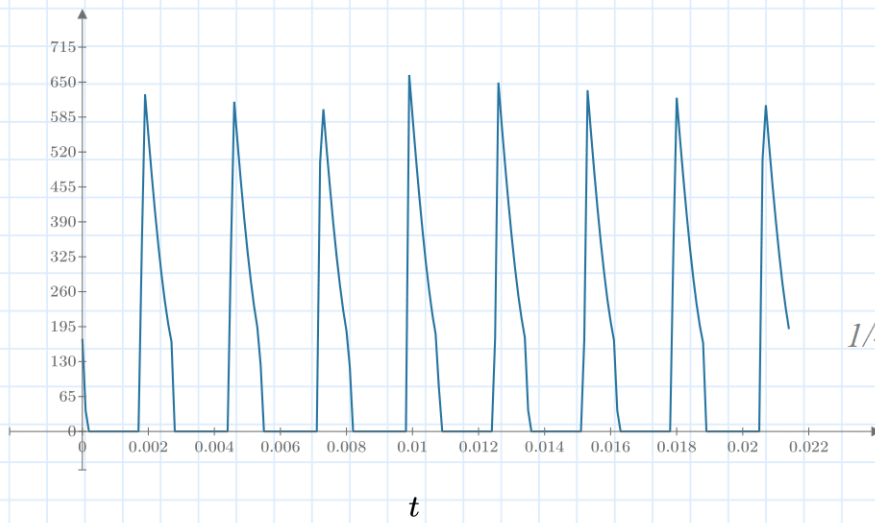
24. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М. До питання вдосконалення технології фрезерування деталей із перемінною жорсткістю. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта* : тези доп. 25-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2017, Харків, 17–19 трав. 2017 : у 4 ч. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. Ч. 1. С. 107.

URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/38749>

25. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М. До питання удосконалення технології фрезерування деталей з нерівномірною жорсткістю. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво* : матеріали 16-ї міжнар. молодіж. наук.-техн. конф., Суми, 26–29 жовт. 2016. Суми : Сум. держ. ун-т., 2016. С. 15–17.

URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/50430>

$$Fy14 := \left(\underset{3}{milling} \overset{1}{\curvearrowright} \right)^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ \vdots \\ 215 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 172.137 \\ 38.9 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}$$



$Fy14$

$1/4$ глибини різання a_e

$$peak_val14 := \max \left(\left(\underset{3}{milling} \overset{1}{\curvearrowright} \right)^T \right) = 663.384$$

$$Fy12 := \left(\underset{3}{milling} \overset{2}{\curvearrowright} \right)^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ \vdots \\ 215 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 172.137 \\ 38.9 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

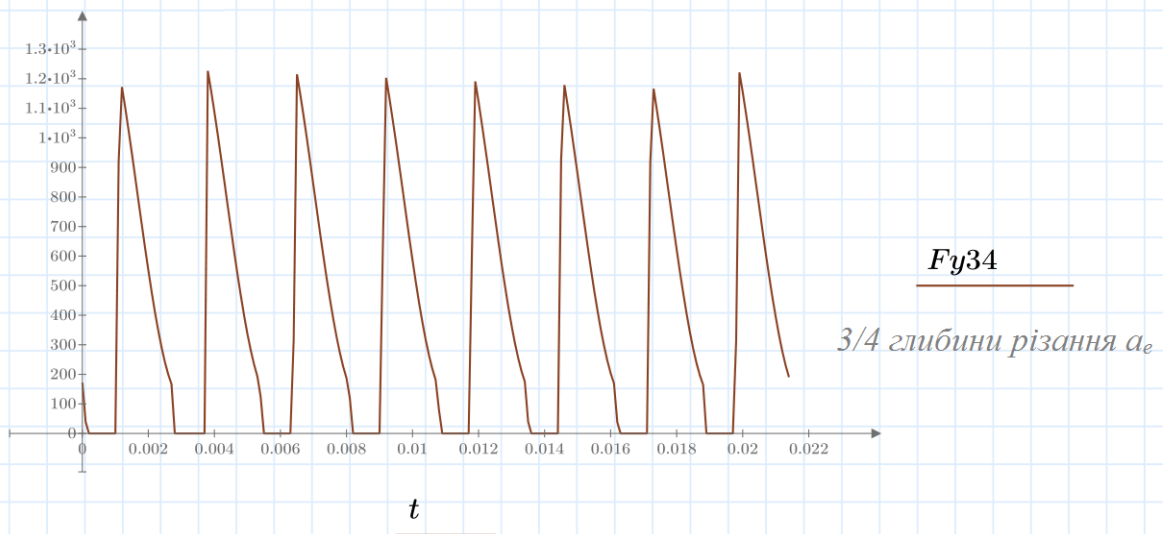


$Fy12$

$1/2$ глибини різання a_e

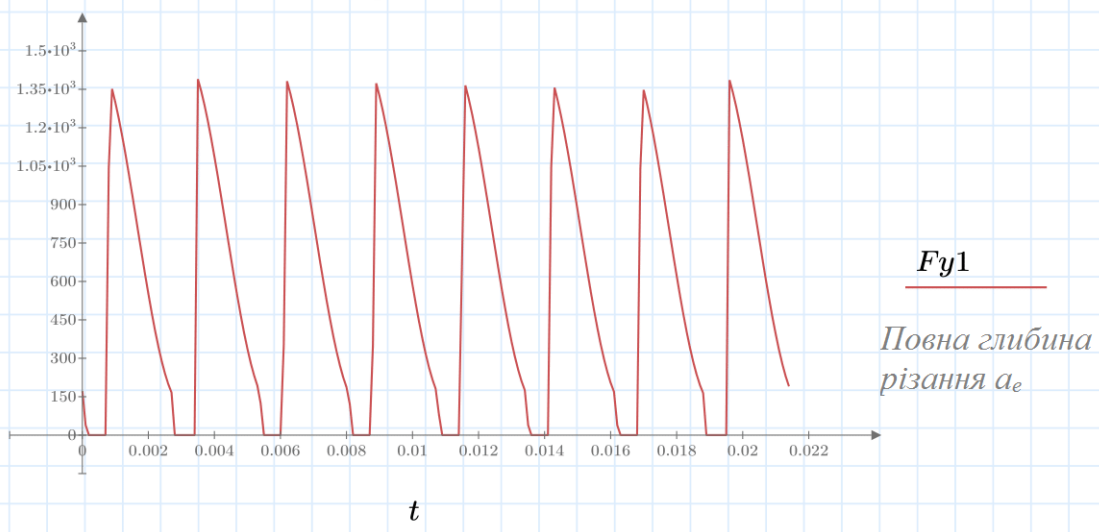
$$peak_val12 := \max \left(\left(\underset{3}{milling} \overset{2}{\curvearrowright} \right)^T \right) = 983.758$$

$$Fy34 := \left(\text{milling}_3^{\widehat{3}} \right)^T = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ 215 \end{matrix} \begin{bmatrix} 172.137 \\ 38.9 \\ \vdots \end{bmatrix}$$



$$peak_val34 := \max \left(\left(\text{milling}_3^{\widehat{3}} \right)^T \right) = 1.227 \cdot 10^3$$

$$Fy1 := \left(\text{milling}_3^{\widehat{4}} \right)^T = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ \vdots \\ 215 \end{matrix} \begin{bmatrix} 172.137 \\ 38.9 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}$$



$$peak_val1 := \max \left(\left(\text{milling}_3^{\widehat{4}} \right)^T \right) = 1.39 \cdot 10^3$$

ДОДАТОК В

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ



ЗАТВЕРДЖУЮ

з.в.о. проректора з наукової роботи
Навчально-наукового інституту механічної інженерії і
транспорту НТУ «ХПІ»

Руслан КРИВОБОК
«14» травня 2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

в навчальний процес результатів дисертаційної роботи Кононенка С. М. на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

Комісія в складі: голови – завідувача кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту НТУ «ХПІ» Пермякова О. О., членів комісії – професора кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту НТУ «ХПІ» Набоки О. В. та доцента кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту НТУ «ХПІ» Котляра О. В., склала цей акт про те, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Кононенка С. М. безпосередньо впроваджено в навчальний процес кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХПІ».

У дисертаційній роботі здобувача розроблено науково обґрунтоване програмно-технологічне забезпечення для розрахунку й оптимізації параметрів механічної обробки (зокрема кінцевого та високошвидкісного фрезерування) тонкостінних елементів деталей машин із перемінною малою жорсткістю (зокрема лопаток осевих турбін). Сформульовано методики моделювання деформацій, аналізу частотних характеристик та відхилень заготовки під дією силових та гідродинамічних факторів, а також розроблено алгоритми вибору оптимальних стратегій фрезерування для підвищення точності, якості та вібронадійності елементів турбомашин.

Матеріали дисертації використовуються під час викладання дисциплін навчального плану для підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальностями G9 «Прикладна механіка» та G11 «Галузеве машинобудування»:

1. «CAD/CAM/CAE системи» – матеріали дисертації щодо числового аналізу деформацій і відхилень елементів малої жорсткості за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) використано при підготовці лабораторних робіт та практичних занять із комп'ютерного моделювання процесів обробки.

2. «Комп'ютерне програмування верстатів з ЧПК та робототехнічних систем» – розроблені автором програмні рішення для автоматизованого вибору оптимальних параметрів різання та стратегій обробки тонкостінних деталей впроваджено у розділи курсу, присвячені розробці та оптимізації керуючих програм для верстатів із ЧПК.

3. «Прогресивні технології у машинобудуванні» – теоретичні підходи щодо високошвидкісного фрезерування деталей із нерівномірною жорсткістю та застосування гідродинамічного обтікання (струминної підтримки рідиною) інтегровано в лекційний матеріал та тематику курсового й дипломного проектування.

Результати, отримані в роботі, мають практичну значущість для підготовки здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти за напрямками G9 та G11.

Голова комісії:

Члени комісії:

Олександр ПЕРМЯКОВ

Олена НАБОКА

Олексій КОТЛЯР

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора
ТОВ «Технополіс Машинобудування»Сергій МИЛЬНИКОВ
« 11 » травня 2026 р.

АКТ

впровадження матеріалів науково-дослідної роботи за темою «Технологічне забезпечення високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною малою жорсткістю при керуванні величиною припуску», виконаної аспірантом кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» КОНОНЕНКО Сергієм Миколайовичем

Даним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи за вищевказаною темою КОНОНЕНКА С. М. використані для вдосконалення розробки технологічних процесів виготовлення деталей малої жорсткості. У процесі впровадження застосовано методичні підходи до вибору параметрів високошвидкісного фрезерування та моделювання впливу пружних деформацій на показники точності.

Головний інженер
ТОВ «Технополіс
Машинобудування»



Олександр АЛЕКСЕНКО