

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 MСE 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 шорсткості 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., Питель 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 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 багатолезвійного 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 ІХ-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 «ХП», 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 «ХП», 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>.