

ІНФОРМАЦІЙНІ ПРОГРАМИ ТА КОМП'ЮТЕРНО- ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.9.044 + 621.914.1

DOI: 10.31471/1993-9965-2022-1(52)-65-72

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТУРБОМАШИН

С. М. Кононенко, С. С. Добротворський, Є. В. Басова, Л. Г. Добровольська*

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, e-mail: yevhenia.basova@khrpi.edu.ua*

Наведено реалізацію розроблення програмного рішення для обчислення параметрів фрезерування тонкостінних елементів турбомашин. Виготовлення тонкостінних елементів вимагає високої уваги до вибору оптимальних параметрів обробки. Складна геометрія тонкостінних елементів, низька здатність чинити опір деформації з перепоною в процесі формоутворення поверхонь високої точності. Наявні рішення здебільшого передбачають отримання параметрів обробки поверхонь деталей з абсолютною жорсткістю, тому мета наведеної реалізації – це врахування особливостей тонкостінних елементів та реалізація взаємодії з цифровим представленням фізичного процесу в комплексному вигляді. Інтелектуальна система передбачає як аналітичні мікросервіси обчислення та оптимізації параметрів, так і залучення САЕ середовища сторонніх розробників із можливістю виконання скриптів. Джерелом теоретичної бази даних табличних значень є публікації, дослідження, інженерні машинобудівні довідники. Інформація про входні параметри структурована в блоки, що відповідають геометрії елементу, властивостям матеріалу, різновиду й потужності верстата, особливості геометрії, та матеріалу інструменту, процесу зняття припуску з включенням режиму високошвидкісної обробки. Реалізація дає змогу здійснювати розрахунок сил різання, що виникають у процесі зняття припуску, у напрямку мінімальної жорсткості тонкостінного елемента. Моделюються власні частоти завантаженої геометрії та будується відповідний амплітудний відгук, який включається до аналізу та формується рекомендаційний висновок щодо відповідності входним технічним умовам. Передбачається можливість використання та накопичення дослідних результатів. Завданням дослідження є розроблення системи, яка може бути інтегрована в сучасне виробництво, що відповідає баченню прогресивної концепції Індустрії 4.0.

Ключові слова: тонкостінні елементи, високошвидкісне фрезерування, параметри фрезерування, відхилення, МСЕ, програма.

The implementation of the development of a software solution for calculating the milling parameters of thin-walled elements of turbomachines is presented. The production of thin-walled elements requires high attention to the choice of optimal processing parameters. Complex geometry of thin-walled elements, low ability to resist deformation with an obstacle in the process of forming high-precision surfaces. The existing solutions mainly provide for obtaining parameters for processing the surfaces of parts with absolute rigidity, so the purpose of this implementation is to take into account the features of thin-walled elements, and implement interaction with the digital representation of the physical process in a complex form. The intelligent system provides both analytical microservices for calculating and optimizing parameters, and the use of a third-party CAE environment with the ability to execute scripts. The source of the theoretical database of tabular values is publications, research, engineering machine-building reference books. Information about input parameters is structured in blocks that correspond to the

element geometry, material properties, machine type and power, features of the geometry and Tool material, the process of removing allowances with the inclusion of high-speed processing mode. The implementation makes it possible to calculate the cutting forces that occur during the removal of the allowance, in the direction of the minimum rigidity of the thin-walled element. The eigenfrequencies of the loaded geometry are modeled, and the corresponding amplitude response is constructed, which is included in the analysis and a recommendation conclusion is formed for compliance with the input technical conditions. It provides for the possibility of using and accumulating research results. The aim of the research is to develop a system that can be integrated into modern production, which corresponds to the vision of the progressive concept of Industry 4.0.

Keywords: thin-walled elements, high-speed milling, milling parameters, deviation, FEM, program

Вступ

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 та зниження ваги вузлів, тонкостінні елементи турбомашин обробляються на високоточному багатокординатному обладнанні способом видалення значного об'єму матеріалу заготовки та інтелектуально місткою підготовкою виробництва.

Низька жорсткість тонкостінних елементів призводить до деформації та коливань у процесі обробки, а мала товщина є критичним чинником, із огляду на 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 [1]. Проте, результати моделювання, розрахунків часто мають розрізнену форму. Виготовленню якісної продукції серійного виробництва передують проєктування, тривалий період випробувань. Доводиться часто змінювати, коригувати параметри обробки, налаштування верстата, розробляти різні спеціальні пристосування для установлення 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 вірні рішення, що є критичним за високої вартості та складності виробництва тонкостінних елементів турбомашин.

Нині 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 необхідністю та важливі в розвитку сучасної галузі.

Отже, машинобудівна галузь визначається високими потребами підвищення економічної ефективності, продуктивності й точності. Способом реалізації цієї потреби є впровадження нових засобів підготовки виробництва з використанням інтелектуальних систем вирішення інженерних завдань.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Велика увага приділяється проблемам, пов'язаним з низькою жорсткістю тонкостінних елементів деталей, через чутливість до таких факторів, як сила різання, сила затискання, 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 [2] за допомогою багатомасштабного аналізу якості та контролю, наведеному методу генерації знань про входні дані у процесі виробництва, реалізується технологія цифрових двійників. Пропонований метод базується на моделі знань про якість на макро-, мезо- та мікрорівнях. Мережа відстеження помилок, створена за допомогою багатомасштабної моделі знань, заснованої на зв'язку між різними процесами.

Щоб адаптуватися до швидких виробничих циклів та підвищити ефективність обробки тонкостінних деталей, у роботі [3] представлена платформа цифрових двійників для виробництва тонкостінних деталей, що дозволяє оператору верстата управляти змінами продукту, прискорити та точніше виконати етапи запуску виробництва. Ця платформа складається з трьох компонентів: підготовки, обробки та вимірювання. Залучення та постійне оновлення статусу цифрових двійників у процесі обробки дає доступ до інтеграції різної

виробничої інформації та даних для операторів верстатів та інших цифрових двійників. Цифрова модель отримує інформацію та дані для постійного вдосконалення та підтримки узгодженості з фізичним верстатом.

Існує безліч рішень для автоматизації процесу вибору параметрів обробки, однак багато з них придатні до взаємодії з абсолютно жорсткою деталлю. У дослідженні [4] було проведено попередню розробку рішення з урахуванням основних особливостей тонкостінних деталей. Надійність моделі статичного відхилення було підтверджено методом кінцевих елементів. Проведено моделювання ортогональної обробки тонкостінного зразка. Рішення є каркасом, необхідним для розширення і модифікації його модулів. Відповідно, рішення вимагає подальших покращень та доопрацювань. Основні напрямки: доопрацювання моделювання процесу фрезерування тонкостінного зразка, з точки зору включення до розрахунку складної геометрії; додавання нових геометричних параметрів інструменту, розширення рішення шляхом врахування динамічної поведінки зразка, більш широкого застосування можливостей скриптів для керування роботи САЕ середовища.

Важливим аспектом, який необхідно врахувати при обробці тонкостінних елементів, є коливання пружної системи. У процесі обробки інструмент, що обертається, чинить на деталь циклічний вплив. Якщо частота впливу збігається зі власною частотою тонкостінного елемента деталі, амплітуда коливань збільшується. Запропоновано детальний попередній аналіз за допомогою інженерних засобів моделювання, як технологічне рішення для прогнозування відхилень у процесі фрезерування тонкостінних деталей зі складною геометрією [5-6]. Доведено, що впровадження додаткового демпфуючого фактора позитивно впливає на частотні характеристики пружної системи деталі.

У статті [7] представлено методологію моделювання машина-інструмент-цифровий-двійник (MTDT) на основі відкритих, уніфікованих та платформонезалежних стандартів зв'язку. Наводиться розробка додатків, щоб продемонструвати потенціал запропонованого підходу. Першим з них є веб-додаток для моніторингу стану верстата, який дозволяє користувачам відстежувати статус у реальному часі, а також тривимірну модель верстата через веб-браузери на мобільних пристроях. Другий додаток – людино-

машинний інтерфейс (HMI) з доповненою реальністю (AR), який надає користувачам інтуїтивно зрозумілу і покращану візуалізацію процесів обробки.

Одне з досліджень [8] є цифровим рішенням для визначення сил у процесі фрезерування. Рішення включає оптичне сканування для визначення геометрії ріжучої кромки інструменту, сканування для вимірювання профілю інструменту, аналіз МСЕ ортогонального різання для оцінки коефіцієнтів сили різання. Прогнозована сила різання порівнюється з експериментальними даними.

У статті [9] описується базована на фізичних принципах Байєсова мережа для визначення межі стійкості фрезерування та параметрів системи за допомогою ітеративного тестування. У роботах [10-12] наводиться динамічна компенсація відхилю поверхні при 5-ти осьовому сферичному фрезеруванні на основі розширеного опису умов різання та 3D-корекція обробки лопаток моноколів. Дослідженням такого питання займалися і автори робіт [13-15], що показало кореляцію отриманих результатів та підходів. У роботах [16-17] наводиться онлайн системи компенсації похибок обробки тонкостінних елементів деталей.

Мета статті – врахувати особливості фрезерування тонкостінних елементів турбомашин, з огляду на те, що наявні рішення здебільшого передбачають отримання параметрів обробки поверхонь деталей з абсолютною жорсткістю, та реалізувати взаємодію з цифровим представленням фізичного процесу в комплексному вигляді.

Виклад основного матеріалу

Для визначення сили, що діє у напрямку мінімальної жорсткості тонкостінного елемента під час обробки, як чинника небажаної пружної деформації, необхідно визначити складові сили різання.

Для розрахунку складових сили різання, спіральна фреза у процесі кінцевого фрезерування поділяється на кінцеву кількість дискових елементів вздовж осі обертання. Для i -го осьового дискового елемента j -ї канавки диференціальні сили різання у тангенціальному, радіальному, та осьовому напрямках можуть бути записані наступним чином:

$$\begin{bmatrix} dF_{t,ij} \\ dF_{r,ij} \\ dF_{a,ij} \end{bmatrix} = g(\varphi_{ij}) \cdot a_i \left\{ \begin{bmatrix} K_{tc} \\ K_{rc} \\ K_{ac} \end{bmatrix} h_{ij}(\varphi_{ij}) + \begin{bmatrix} K_{te} \\ K_{re} \\ K_{ae} \end{bmatrix} \right\}, \quad (1)$$

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;

φ_{ij} – кут занурення в оброблюваний матеріал i -го дискового елемента j -ї канавки;

a_i – осьова товщина i -го дискового елемента;

$h_{ij}(\varphi_{ij})$ – миттєва товщина не зрізаної стружки для i -го елемента j -ї канавки, що за наявності пружної деформації залежить від сукупності динамічної поведінки – регенеративних коливань (положення елемента в системі координат під час t) та статичної поведінки – статичного відхилення елемента;

$g(\varphi_{ij})$ – функція для визначення того, чи знаходиться i -й ріжучий елемент j -ї канавки у процесі різання, чи ні:

$$g(\varphi_{ij}) = \begin{cases} 1, & \varphi_{entry} \leq \varphi_{ij} \leq \varphi_{exit}, \\ 0, & \end{cases} \quad (2)$$

де $\varphi_{entry}, \varphi_{exit}$ – межі зони контакту інструмент-деталь, кути входу та виходу ріжучої кромки фрези.

Коефіцієнти різання передбачаються постійними для пари „інструмент – оброблюваний матеріал”, і можуть бути отримані або емпірично, або з використанням класичних перетворень формул для косокутного різання. Іноді вони виражаються як нелінійна функція миттєвої чи середньої товщини стружки. Додатковими джерелами пошуку значень результату рівняння проведені досліджень, дані публікацій, інженерні машинобудівні довідники.

Згідно класичної кругової моделі траєкторії руху ріжучої кромки фрези [17], заснованої на матриці повороту в тривимірному просторі, повні складові сили різання можуть бути записані як сума сил, що вносяться всіма зубами при різанні заготовки при $\varphi_{ij}(t)$:

$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \\ F_z(t) \end{bmatrix} = \quad (3)$$

$$= \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} \left\{ \begin{bmatrix} -\cos(\varphi_{ij}(t)) & -\sin(\varphi_{ij}(t)) & 0 \\ \sin(\varphi_{ij}(t)) & -\cos(\varphi_{ij}(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dF_{t,ij} \\ dF_{r,ij} \\ dF_{a,ij} \end{bmatrix} \right\},$$

де N_j, N_i – кількість всіх канавок та дискових елементів.

Реакція системи на динамічне силове збурення наступна:

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

У третьому випадку виникає явище резонансу. 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 тонкостінного елемента. 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 у просторі залежить від власних частотних характеристик, зумовлених властивостями матеріалу та геометрією профілю.

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

Отже, з огляду на потенціал програмного рішення, має сенс розроблення можливості аналізу завантажених CAD-файлів моделей. Крім того, давати змогу оцінити амплітуди відхилень тонкостінного елемента, отримати значення максимального напруження в процесі фрезерування вільного кінця деталі. Реалізувати механізм перевірки того, чи лежить відхилення елемента при розрахованих подачах, швидкостях та інших параметрах, в межах початкового заданого поля допуску. З огляду на широке застосування додаткового демпфування при обробці тонкостінних

елементів, має сенс додавання можливості внесення корекції показників сили різання для оцінки зміни результуючих параметрів.

Джерелом теоретичної бази даних табличних значень є публікації, дослідження, інженерні машинобудівні довідники [18], аналітичні розрахунки та аналіз МСЕ, зокрема для перевірки адекватності отриманих параметрів.

Розроблення програмного продукту починається безпосередньо з аналізу вимог, у результаті чого, формується специфікація, яка включає структуровану інформацію про функціональність, продуктивність, конструктивні обмеження та атрибути програмного забезпечення та його зовнішніх інтерфейсів.

Наступним кроком є розроблення основного алгоритму програми, тобто сукупності блоків, що взаємодіють один з одним згідно з вимогами, в певній послідовності. Програмування, та тестування-випробування програмного продукту, що має

Достатньо мати будь-який пристрій з веб-браузером.

Програма починається зі зчитування таких параметрів, як:

- геометрія тонкостінного елемента;
- технічні вимоги до точності виготовлення;
- матеріал;
- певна позиція інструменту (опційно).

Вхідні технічні параметри верстата для визначення граничних режимів:

- число обертів за хвилину;
- число обертів за хвилину за максимального навантаження;
- пікова потужність шпинделя;
- межі подачі.

Аналогічним чином зчитуються параметри інструменту, різання, припуску, на основі чого проводиться розрахунок швидкостей та подач, та порівняння з базою даних табличних значень.

Виконується розрахунок компонентів сили різання, враховується наявність корекцій у разі

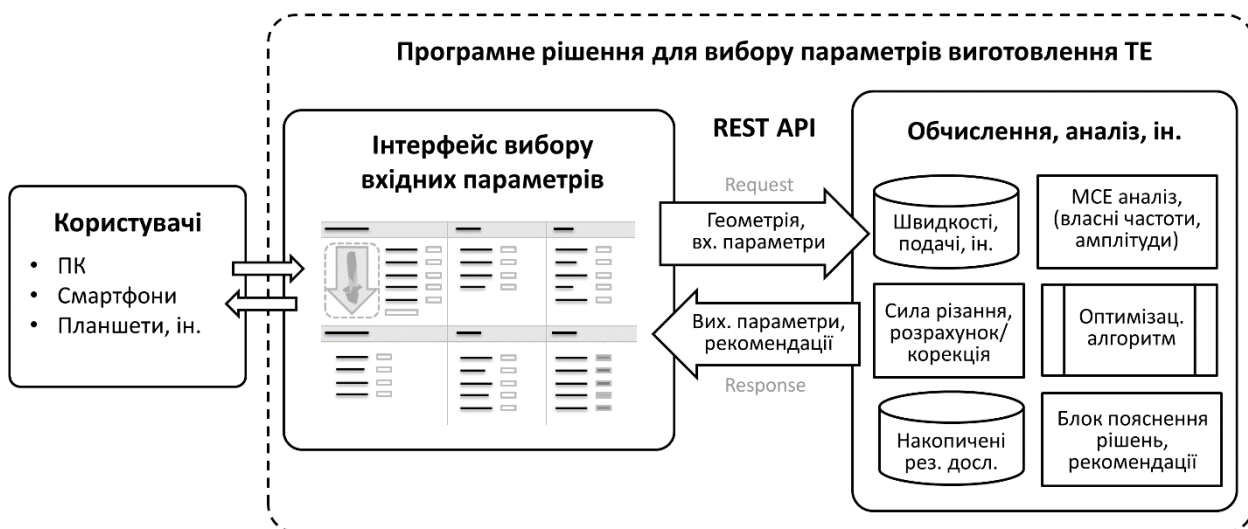


Рисунок 1 – Загальна архітектура програмного рішення для вибору параметрів фрезерування тонкостінних елементів турбомашин

на меті перевірку відповідності між реальною та очікуваною поведінкою програми. Нарешті, система інтеграція та супровід програмного забезпечення.

Загальна архітектура програмного рішення для вибору параметрів представлена на рис. 1.

Програма реалізується у форматі веб-застосунку на базі мови програмування JavaScript. Вибір зумовлений можливістю доступу до програми з будь-якої платформи миттєво, не потребує інсталяційних файлів.

демпуфуючого фактора. На кожному з етапів відбувається валідація знаходження в межах допустимих значень. Відбувається трансфер параметрів до САЕ – середовища, запуск якого та обробка даних можлива за допомогою виконання Python інтерпретованих скриптів.

Наприкінці виконується перевірка, чи знаходиться прогнозоване відхилення у полі допуску технічних вимог до точності. Якщо так, результату буде присвоєний певний атрибут можливості виконання обробки, чи атрибут, що параметри знаходяться близько

свого максимуму, якщо ні – атрибут необхідності внесення корекцій. Дані потрапляють до бази, і у блоці пояснення рішень та рекомендацій формується відповідний звіт.

Сесії обчислення супроводжуються формуванням лог-файлів, котрі містять системну інформацію для визначення помилок роботи системи загалом, діагностування внесених даних, протоколювання операцій для подальшого аналізу, зібрання статистики.

Серверна частина розроблюється на Node.js – програмній платформі, що побудована для виконання JavaScript як програмного коду загального значення, а саме, взаємодії з пристроями введення-виведення через власний API. Взаємодія між клієнтом та сервером відбувається через REST API (передача репрезентативного стану). Передача даних здійснюється у форматі JSON. Табличні значення, вхідні та вихідні параметри зберігаються у базі даних.

Формат JSON має кілька переваг: висока швидкість передачі та мала вага. Він також дозволяє виконувати парсинг даних на стороні сервера та забезпечує широкий діапазон сумісності з різними операційними системами, браузерами та пристроями. Завдяки підвищеній сумісності це вирішує проблему неоднорідності даних. На сьогодні, формат JSON вважається одним з кращих для обміну даними будь-якого розміру і типу.

Неоднорідність даних та сумісність різних форматів даних – це деякі проблеми, з якими стикаються розробники та споживачі послуг. Надання відповідних API-інтерфейсів для доступу до даних та повернення даних у JSON форматі дає змогу розробити похідні рішення без глибокої та інтелектуально місткої інтеграції з основним продуктом.

Висновки

Отже, існує безліч рішень для автоматизації процесу вибору параметрів обробки, але багато з них спрямовані на опрацювання параметрів деталей з абсолютною жорсткістю. У цьому дослідженні було наведено попереднє розроблення програмного рішення з урахуванням основних особливостей тонкостінних елементів турбомашин.

Підхід полягає в аналітичній реалізації в межах розрахункових блоків та підключенні стороннього CAE середовища з можливістю виконання скриптів.

Наведено математичну модель розрахунку складових сили різання. Розглянуто загальну архітектуру програмного рішення.

Рішення є каркасом, необхідним для додавання і розширення кола виконуваних завдань і вимагає подальшого розроблення та доопрацювань. Основні напрями: валідація показників складових сили різання визначеної моделі з допомогою MCE, передача даних частотного розрахунку та графічна візуалізація результатів у відповідному блоці, додавання механізму аутентифікації та передачі даних на базі токенів доступу.

Загальний підхід розроблено в рамках науково-дослідного проекту «Розробка методології оптимального проектування та виготовлення високоефективних, високонадійних турбомашин з врахуванням різних режимів роботи» (№ 0121U107511).

Література

1. Кусий Я.М., Струпицький В.В., Литвиняк Я.М., Ментинський С.М. Панчук В.Г. Формування вихідних параметрів вибору на стадії створення його життєвого циклу. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2021. №1(50). С. 77-90. DOI: 10.31471/1993-9965-2021-1(50)-77-90.
2. Liu S., Lu Y., Li J., Song D., Sun X., Bao J. Multi-scale evolution mechanism and knowledge construction of a digital twin mimic model. *Elsevier BV*. 2021. Vol. 71. P. 102123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102123>.
3. Zhu Z., Xi X., Xu X., Cai Y. Digital Twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing. *In Journal of Manufacturing Systems*. Elsevier BV. 2021. Vol. 59. P. 453-466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.015>.
4. Dobrotvorskiy S., Kononenko S., Basova Y., Dobrovolska L., Ivanova M. Development of Optimum Thin-Walled Parts Milling Parameters Calculation Technique. *DSMIE 2021. LNME*. P. 343-352. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_34.
5. Kononenko S., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Dobrovolska L., Yepifanov V. Simulation of Thin-walled Parts End Milling with Fluid Jet Support. *DSMIE 2020. LNME*. P. 380-389. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_37.
6. 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 Polytech-*

- nica. 2019. Vol. 59. P. 283–291. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0283>.
7. Liu C., Hong X., Zhu Z., Xu X. Machine Tool Digital Twin: Modelling Methodology and Applications. *Proceedings of International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE*. 2018.
8. Gomez M., No T., Schmitz T. Digital force prediction for milling. *In Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 48. P. 873–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.125>.
9. Cornelius A., Karandikar J., Gomez M., Schmitz T. A Bayesian Framework for Milling Stability Prediction and Reverse Parameter Identification. *In Procedia Manufacturing*. 2021. Vol. 53. P. 760–772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.073>.
10. Ditrach M.-A., Uhlich F. Self-optimizing compensation of surface deviations in 5-axis ball-end milling based on an enhanced description of cutting conditions. *In CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 31. P. 224–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.013>.
11. Мозговой В. Ф., Балушок К. Б., Котов И. И., Панасенко В. А., Бирук М. К. Стратегии обработки лопаток моноколёс на обрабатывающих центрах с ЧПУ с переменной 3D-коррекцией. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 7. С. 22–28.
12. Li W., Wang L., Yu G. Force-induced deformation prediction and flexible error compensation strategy in flank milling of thin-walled parts. *In Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 297. P. 117258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117258>.
13. Altintas Y., Tuysuz O., Habibi M., Li Z. L. Virtual compensation of deflection errors in ball end milling of flexible blades. *In CIRP Annals*. 2018. Vol. 67, Issue 1. P. 365–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.03.001>.
14. Scippa A., Sallese L., Grossi N., Campatelli G. Improved dynamic compensation for accurate cutting force measurements in milling applications. *In Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 54–55. P. 314–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.08.019>.
15. Diez, E., Perez, H., Marquez, J., & Vizan, A. Feasibility study of in-process compensation of deformations in flexible milling. *In International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 94. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.008>.
16. Wasik M., Kolka A. Machining Accuracy Improvement by Compensation of Machine and Workpiece Deformation. *In Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 11. P. 2187–2194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.365>.
17. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. *Cambridge university press*. 2012. Second ed., p. 43.
18. Oberg E., Jones F., Horton H., Ryffel H. Machinery's Handbook 29th ed. Christopher J, New York : *Industrial Press*. 2012. P. 1081-1091.

References

1. Kusyi Ya. M., Stupnytskyy V. V., Lytvyniak Ya. M., Mentynskyi S. M., Panchuk V. H. Output parameters at development and production stage of a product in its life cycle. *Scientific bulletin Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas*. 2021. No 1(50). P. 77-90. DOI: [10.31471/1993-9965-2021-1\(50\)-77-90](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-1(50)-77-90). [in Ukrainian]
2. Liu S., Lu Y., Li J., Song D., Sun X., Bao J. Multi-scale evolution mechanism and knowledge construction of a digital twin mimic model. Elsevier BV. 2021. Vol. 71. P. 102123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102123>.
3. Zhu Z., Xi X., Xu X., Cai Y. Digital Twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing. *In Journal of Manufacturing Systems*. Elsevier BV. 2021. Vol. 59. P. 453–466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.015>.
4. Dobrotvorskiy S., Kononenko S., Basova Y., Dobrovolska L., Ivanova M. Development of Optimum Thin-Walled Parts Milling Parameters Calculation Technique. *DSMIE 2021. LNME*. P. 343–352. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_34.
5. Kononenko S., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Dobrovolska L., Yepifanov V. Simulation of Thin-walled Parts End Milling with Fluid Jet Support. *DSMIE 2020. LNME*. P. 380–389. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_37.
6. 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. Vol. 59. P. 283–291. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0283>.
7. Liu C., Hong X., Zhu Z., Xu X. Machine Tool Digital Twin: Modelling Methodology and Applications. *Proceedings of International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE*. 2018.
8. Gomez M., No T., Schmitz T. Digital force prediction for milling. *In Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 48. P. 873–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.125>.

9. Cornelius A., Karandikar J., Gomez M., Schmitz T. A Bayesian Framework for Milling Stability Prediction and Reverse Parameter Identification. In *Procedia Manufacturing*. 2021. Vol. 53. P. 760–772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.073>.
10. 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. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 31. P. 224–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.013>.
11. Mozgovoy V. F., Balushok K. B., Kotov I. I., Panasenko V. A., Biruk M. K. “Strategii obrabotki lopatok monokoles na obrabatyvayushchikh tsentrah s ChPU s peremennoy 3D-korreksiyey” [Strategies for processing blades on CNC machining centers with variable 3D correction]. *Kharkiv, Aerospace Engineering and Technology*, 2013. Vol. 7. P. 22–28. [in Russian]
12. Li W., Wang L., Yu G. Force-induced deformation prediction and flexible error compensation strategy in flank milling of thin-walled parts. In *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 297. P. 117258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117258>.
13. Altintas Y., Tuysuz O., Habibi M., Li Z. L. Virtual compensation of deflection errors in ball end milling of flexible blades. In *CIRP Annals*. 2018. Vol. 67, Issue 1. P. 365–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.03.001>.
14. Scippa A., Sallese L., Grossi N., Campatelli G. Improved dynamic compensation for accurate cutting force measurements in milling applications. In *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 54–55. P. 314–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.08.019>.
15. Diez, E., Perez, H., Marquez, J., & Vizan, A. Feasibility study of in-process compensation of deformations in flexible milling. In *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 94. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.008>.
16. Wąsik M., Kolka A. Machining Accuracy Improvement by Compensation of Machine and Workpiece Deformation. In *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 11. P. 2187–2194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.365>.
17. Altintas Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge university press. 2012. Second ed., p. 43.
18. Oberg E., Jones F., Horton H., Ryffel H. *Machinery's Handbook 29th ed.* Christopher J, New York : Industrial Press. 2012. P. 1081-1091