

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

БАСОВА ЄВГЕНІЯ ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 621.9:621.002.3

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ МАЛИХ ТА СЕРЕДНІХ
МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ СТРЕСУ НА
ЗАСАДАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ**

спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків–2026

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.
Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Опоненти:

доктор технічних наук, професор
Пасічник Віталій Анатолійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», Міністерство освіти і науки України,
професор кафедри конструювання машин, м. Київ;

доктор технічних наук, професор
Кусий Ярослав Маркіянович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
Міністерство освіти і науки України, професор
кафедри робототехніки та інтегрованих технологій
машинобудування, м. Львів;

доктор технічних наук, професор
Купріянов Олександр Володимирович,
Харківський національний університет імені В.Н.
Каразіна, Міністерство освіти і науки України,
заступник директора Навчально-наукового інституту
«Українська інженерно-педагогічна академія»,
м. Харків.

Захист відбудеться «19» лютого 2026 року о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Ректорський корпус (аудиторія 38).

З дисертацією та рефератом можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2 та за посиланням:
<https://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vr/archives/7327>

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12



Олена НАБОКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне машинобудування, особливо в сегменті малих і середніх підприємств (МСП), стикається з унікальною проблемою – необхідністю функціонування в умовах критично малої дискретно-нестабільної серійності, зростання складності конструкцій і вимог до якості виробів та зменшення тривалості конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, що значно посилюються глобальними стресовими факторами. Завдання забезпечення високої продуктивності, якості та технологічної гнучкості виробництва завжди є вкрай складним з причини існування діалектичного протиріччя між ними. Традиційні підходи до технологічної підготовки виробництва (ТПВ), що розраховані на стабільні умови роботи, виявляються неефективними в сучасних реаліях, де зовнішні обставини диктують жорсткі вимоги до гнучкості та адаптивності. Основними чинниками таких змін є як ринкові коливання, так і серйозні стресові фактори: військові дії, які обумовили релокацію виробництв і розрив ланцюгів поставок; санкційна політика, що призводить до необхідності імпортозаміщення критичних компонентів; різкі зміни попиту, пов'язані з терміновими потребами оборони та відновлення інфраструктури. Ці умови створюють подвійний стресовий тиск на машинобудівні МСП: з одного боку, технологічні складності власне дрібносерійного виробництва, що пов'язані із внутрішніми обмеженнями (необхідність постійного переналагодження, висока точність виробів тощо), з іншого – зовнішні стресові фактори, що вимагають миттєвої реакції в забезпеченні технологічної стійкості. У таких умовах традиційні системи технологічної підготовки виробництва, що передбачають тривалі цикли розроблення документації та налагодження технологічних процесів, стають серйозною перешкодою. Кожна нова партія продукції чи зміна конструкції вимагає значних витрат часу та ресурсів, що за умови малих обсягів виробництва ускладнює забезпечення технологічної стійкості підприємства, а відтак обмежує можливість досягнення його сталого розвитку в умовах зміни попиту та пропозиції. Особливо гостро це проявляється в ситуаціях, коли потрібно швидко адаптуватися до нових вимог стосовно ТПВ і виготовлення продукції, зміни номенклатури її випуску та забезпечені параметрів якості відповідальних поверхонь деталей машин та агрегатів. У випадку швидких змін у вимогах ринку машинобудівної продукції або кризових ситуацій в умовах критично малої дискретно-нестабільної серійності такі процеси можуть стати значною перешкодою не тільки для ефективності виробництва взагалі, а і для сталості та конкурентоспроможності малих і середніх машинобудівних підприємств зокрема. Вирішення проблеми сталості машинобудівних МСП лежить у впровадженні комп'ютерно-інтегрованих технологій на основі цифровізації та інтеграції багаторівневої 3D-інформації, тобто створенні єдиного цифрового каркасу на основі інтеграції CAD/CAE/CAPP/CAM/ERP-систем та 3D-моделювання елементів життєвого циклу виробу, що може дозволити значно скоротити час адаптації до змін. Стає очевидним, що забезпечення сталості машинобудівних МСП, у тому числі її технологічної стійкості в умовах малої дискретно-нестабільної серійності потребує розроблення нових моделей ТПВ та виготовлення продукції. Як основу забезпечення сталості малих і середніх машинобудівних підприємств в умовах глобальних викликів слід розглядати впровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій, заснованих на цифровізації та інтеграції багаторівневої 3D-інформації на

всіх етапах життєвого циклу виробу. Вирішення цієї актуальної проблеми забезпечення сталості МСП в умовах стресу, яка має важливе значення для розвитку машинобудівної галузі, полягає у дослідженні шляхів і науково-методологічних засад підвищення ефективності ТПВ машинобудівних МСП під час виготовлення деталей машин на основі впровадження концепції наскрізної 3D-цифрової підтримки у елементах їхніх життєвих циклів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» відповідно до визначених пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки (у відповідності до п. 2 статті 3 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки») у рамках виконання завдань держбюджетних НДР МОН України за темами: «Розробка методології оптимального проектування та виготовлення високоефективних, високонадійних турбомашин з врахуванням різних режимів роботи» (ДР No. 0121U107511), де здобувачка була відповідальним виконавцем; «Формування і трансформація періодичних нановуглецевомісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами» (ДР No. 0124U000481), де здобувачка була відповідальним виконавцем; «Створення експериментальних зразків вальниць кочення з підвищеними експлуатаційними характеристиками за критеріями енергоефективності і довговічності» (ДР No. 0125U001616), де здобувачка була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є технологічне забезпечення процесів виготовлення відповідальних деталей машин на основі впровадження концепції наскрізної 3D цифрової підтримки життєвого циклу виробів (в першу чергу шляхом інтеграції CAD/CAE/CAM/CAPP/ERP систем через відповідні перетворення геометричних та фізичних моделей), яка підвищує ефективність ТПВ в умовах малої дискретно-нестабільної серійності, сталості та конкурентоспроможності малих і середніх машинобудівних підприємств в умовах стресу.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- сформулювати теоретичні засади забезпечення технологічної та виробничої стійкості малих і середніх машинобудівних підприємств в умовах глобальних стресів на основі цифровізації;
- формалізувати підхід до мінімізації часу прийняття та реалізації виробничих і технологічних рішень в умовах дискретно-нестабільної серійності виготовлення продукції для забезпечення сталості машинобудівного МСП;
- розробити концептуальний та інструментальний підхід до виявлення взаємозв'язку сталості МСП з фазами коливань машинобудівного ринку в умовах глобальних викликів, з урахуванням специфіки діяльності підприємств в умовах дискретно-нестабільної серійності.
- розробити методологічний та програмно-інструментальний підхід до створення єдиного цифрового простору для наскрізної 3D-цифровізації життєвого циклу продукції машинобудівних МСП на базі об'єднаної цифрової платформи; дослідити вплив цифрової інтеграції етапів життєвого циклу продукції на адаптивність

машинобудівних МСП в умовах стресу (глобальних викликів), у тому числі в рамках концепції Індустрії 4.0;

- розробити адаптивний ланцюг технологічної підготовки виробництва машинобудівної продукції для малих і середніх підприємств в умовах критично малої дискретно-нестабільної серійності;

- визначити роль 3D-цифрових моделей на нано-, мікро-, мезо-, макро- та глоборівнях у процесі прийняття інженерних рішень під час проектування та виготовлення машинобудівних компонентів і агрегатів в умовах критично малої дискретно-нестабільної серійності;

- розробити методологію інтеграції 3D-цифрових моделей у процес прийняття інженерних рішень та здійснити практичну реалізацію теоретичних, методологічних і інструментальних підходів до технологічної підготовки виробництва на прикладі агрегатів і компонентів машин в умовах дискретно-нестабільної серійності.

Об'єкт дослідження – процеси технологічної підготовки виробництва та виготовлення продукції малих і середніх машинобудівних підприємств на основі цифровізації та інтеграції багаторівневої 3D-інформації в умовах глобальних викликів.

Предмет дослідження – науково-методологічні засади підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва в умовах малої дискретно-нестабільної серійності, забезпечення сталості малих і середніх машинобудівних підприємств на основі створення та впровадження концепції наскрізної 3D цифрової підтримки життєвого циклу машинобудівної продукції, що включає розробку технологічних підходів до проектування, механообробки та модифікації відповідальних виробів машинобудування на основі аналізу, синтезу та інтеграції багаторівневої цифрової інформації.

Методи дослідження. Під час виконання дисертаційної роботи застосовувалися сучасні методи теоретичних, числових та експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження ґрунтуються на класичних законах механіки, теорії обробки матеріалів, законах теплопередачі та теплообміну, а також матеріалознавстві. Для аналізу процесів формування точності та якості поверхонь деталей використовувалися методи аналітичного моделювання, зокрема теорія коливань пружних систем. Числові дослідження включали використання методу скінченних елементів для аналізу напружено-деформованого стану деталей, модального та гармонічного аналізу, а також застосування методу градієнтного спуску для оптимізації параметрів фрезерування. Це дозволило мінімізувати шорсткість поверхні та забезпечити оптимальний базовий стан для подальшого лазерного текстурування в межах двостадійного процесу оброблення. Для моделювання прогресивних технологічних процесів виготовлення деталей машин застосовувалися імітаційні методи на основі цифрових двійників та систем інтелектуального аналізу даних. Експериментальні дослідження здійснювалися з використанням сучасних методів вимірювання та аналізу. Перевірка результатів теоретичних розробок проводилася в лабораторних та виробничих умовах із застосуванням прецизійного обладнання та цифрових систем контролю. Аналіз впливу цифровізації на технологічні процеси здійснювався шляхом експериментального підтвердження ефективності впроваджених цифрових

технологій у малих та середніх машинобудівних підприємствах. Достовірність отриманих результатів забезпечувалася верифікацією математичних моделей, порівнянням із експериментальними даними, а також апробацією розроблених технологічних підходів у реальних виробничих умовах. Дослідження проводили з використанням приладів та обладнання кафедри матеріалознавства НТУ «ХП», центру колективного користування науковим обладнанням «Лабораторія мікро- і наносистем, новітніх матеріалів та технологій», за участю НТУ «ХП» (наказ МОН України № 444 від 02.05.2018 р.), центру колективного користування науковим обладнанням «Дослідницький центр лазерних та оптоелектронних технологій», за участю НТУ «ХП» (наказ МОН України № 1439 від 19.11.2019 р.), лабораторії лазерних та плазмових технологій АТ «ФЕД», Українсько-Американського ТОВ Фірма «КОДА».

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що на основі системного аналізу закономірностей виробництва машинобудівної продукції в умовах малої дискретно-нестабільної серійності випуску запропоновано новий підхід до підвищення ефективності ТПВ на основі створення та впровадження концепції наскрізної 3D цифрової підтримки життєвого циклу машинобудівної продукції, який забезпечує сталість малих і середніх машинобудівних підприємств в умовах стресу (глобальних викликів):

1. Вперше запропоновано та сформульовано 3D-концепцію, яка системно поєднує отримання, аналіз, синтез та інтеграцію багаторівневої 3D-інформації на нано-, мікро-, мезо-, макро- та глобальних рівнях. Доведено, що концепція реалізується через 3D вертикальну та 3D горизонтальну інтеграцію цифрових даних, де цифрова 3D інформація представлена не лише у вигляді моделей і симуляцій, але й у вигляді оцифрованих даних реальних об'єктів. Це дозволяє підвищити сталість малих та середніх машинобудівних підприємств України до стресових факторів.

2. Вперше встановлено, що час є ключовим фактором у зміні гнучкості малих і середніх підприємств в умовах хвильових коливань ринку.

3. Вперше розроблено інтегральний функціонал гнучкості для оцінки адаптивності машинобудівних МСП в умовах стресових викликів. Доведено, що оптимізація цього функціоналу методом автоматичного планування на основі переваг забезпечує врахування критичних параметрів виробничого процесу в умовах нестабільності. Встановлено, що впровадження 3D-технологій може функціонувати у протифазі до ключових параметрів виробничого процесу, таких як продуктивність, ефективність управління запасами та якість продукції. Цей феномен дозволяє створити адаптивний механізм компенсації втрат сталості МСП, зокрема в умовах зниження продуктивності або падіння інших критичних параметрів виробничого процесу.

4. Розгалужено проблему цифровізації етапів життєвого циклу виробництва продукції МСП України на глобальному шляхом створення єдиного цифрового простору, шляхом інтеграції науки, освіти та виробництва. Це реалізовано за рахунок послідовного впровадження цифрових програмних модулів на спільній програмній Java-платформі, що ґрунтується на принципах наскрізної інтеграції знань (наукової складової), підготовки фахівців (освітньої складової) та практичної реалізації цих модулів у виробничих процесах (виробничої складової).

5. Вперше сформовано науково обґрунтовану методологію інтеграції QR-коду з 3D-інформацією для адаптивного керування ТПВ на машинобудівних малих і середніх підприємствах, яка забезпечує новий рівень взаємодії фізичного та цифрового середовищ. Встановлено, що використання QR-коду як інтерактивного носія даних дозволяє оперативно отримувати візуалізацію 3D-моделі виробу з поєднанням цифрової та оцифрованої інформації, а також забезпечує автоматизовану адаптацію виробничих параметрів у режимі реального часу.

6. Вперше розроблено принципово новий виробничий ланцюг адаптивного створення високотехнологічної машинобудівної продукції у відповідь на поточний сигнал ринку. Цей ланцюг інтегрує багаторівневу 3D-концепцію, цифрові двійники та кіберфізичні системи на рівні «інженерних рішень» (CAE). Вперше реалізовано підхід, при якому рівень інженерних рішень стає керівною ланкою технологічного ланцюга у створенні конкурентоспроможної високотехнологічної машинобудівної продукції. Доведено, що це забезпечує своєчасну адаптацію продукції до хвильових коливань ринку через вбудовану систему перевірок, цифрове прогнозування, корегування технологічних параметрів та оптимізацію технологічних процесів у режимі реального часу.

7. Вперше обґрунтовано критичну роль комплексного аналізу 3D-характеристик поверхні мікро- і нанорівня у забезпеченні оперативної адаптації виробництва до ринкових коливань через механізми швидкої діагностики, прогнозування ресурсу та динамічного керування технологічними параметрами. Доведено, що використання цифрової інформації про мікротопографію та шорсткість поверхні, отриманої методами електронної, атомно-силової та оптичної мікроскопії, у поєднанні з алгоритмами машинного навчання та нейронними мережами, дозволяє оперативно адаптувати технологічні процеси до ринкових коливань шляхом швидкої діагностики дефектів, прогнозування зносу відповідальних поверхонь деталей та динамічної корекції параметрів обробки в реальному часі.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні та впровадженні комплексної цифровізації й використання багаторівневої 3D-інформації (нано-, мікро-, мезо-, макро- та глоборівні) в ТПВ машинобудівних виробів. Запропоновані підходи забезпечують підвищення ефективності та гнучкості виробничих процесів машинобудівних МСП в умовах малої дискретно-нестабільної серійності за рахунок інтеграції інструментів 3D-концепції в технологічні ланцюги виготовлення високотехнологічних вузлів і агрегатів, що дозволяє адаптувати виробництво до хвильових коливань попиту і пропозиції та зовнішніх дестабілізуючих факторів. Розроблено цифрові підходи до проектування та виготовлення складних виробів, що скорочують терміни розроблення, підвищують якість продукції та забезпечують її відповідність сучасним вимогам. На прикладі турбокомпресорів доведено ефективність поєднання 3D-інформації, цифрових двійників і кіберфізичних систем, що формують основу інноваційної 3D-підготовки виробництва. Запропоновано методику інтеграції 2D/3D-геометричної, фізико-технічної та технологічної інформації на мезо- і макрорівнях із симуляцією процесів на мікро- і нанорівнях, що забезпечує скорочення часу розроблення та адаптацію конструктивних рішень до коливань попиту. Цифрові моделі й програмні рішення апробовано на підприємствах машинобудівної галузі України, де зафіксовано

підвищення продуктивності, зниження витрат і покращення якості кінцевої продукції. Практичну реалізацію принципів 3D-концепції підтверджено під час створення випробувального обладнання для трибологічних досліджень гідро-/газоабразивного зношування. Розроблено конструкцію вузла кріплення зразків, що забезпечує беззорове з'єднання і достовірність відтворення умов експлуатації. Рішення захищено патентом України № UA 129166 C2. Розроблено технологію нанесення висококонтрастного QR-маркування на металеві поверхні за допомогою фемтосекундного лазера. Встановлено оптимальні параметри оброблення ($S_{dr} > 56\%$), що забезпечують інтенсивну оптичну чорноту, довговічність і стабільність зчитування коду протягом усього життєвого циклу деталі. Ця технологія інтегрована у цифрові ланцюги МСП як елемент наскрізної 3D-цифровізації. Ефективність розробленої методології підтверджено впровадженням на підприємствах ПрАТ «Турбогаз» і ТОВ «АРТ ТЕК», що засвідчено актами апробації. Результати роботи впроваджено також у навчальний процес НТУ «ХП» при підготовці фахівців інженерного профілю та можуть бути використані при створенні модульних програмних комплексів інтеграції цифрових двійників і кіберфізичних систем у ТПВ.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, що викладені в дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані здобувачкою особисто. Зокрема, запропоновано та сформульовано 3D-концепцію інтеграції багаторівневої 3D-інформації для підвищення сталості малих і середніх машинобудівних підприємств України до стресових факторів, розроблено інтегральний функціонал гнучкості для оцінки адаптивності МСП в умовах нестабільності та обґрунтовано його оптимізацію на основі автоматизованого планування. Вирішено проблему цифровізації елементів життєвого циклу виробництва продукції МСП шляхом створення єдиного цифрового простору на базі наскрізної Java-платформи, що інтегрує наукову, освітню та виробничу складові. Сформовано методологію інтеграції QR-коду з 3D-інформацією для адаптивного управління технологічною підготовкою виробництва, що забезпечує оперативну взаємодію цифрового та фізичного середовищ. Розвинено науково-теоретичні основи підвищення гнучкості проектування та виготовлення виробів машинобудування через інтеграцію геометричної, фізико-технічної та технологічної інформації. Запропоновано принципово новий адаптивний виробничий ланцюг створення високотехнологічної машинобудівної продукції з використанням 3D-концепції, цифрових двійників і кіберфізичних систем. Розроблено наукові основи конкурентоспроможних технологічних процесів механічної та лазерної модифікації металевих поверхонь із формуванням різнорівневих періодичних 3D-структур на мікро- та нанорівнях для покращення функціональних властивостей матеріалів та реалізації довгострокового і стабільного QR-кодування металевих деталей фемтосекундним лазерним обробленням. Реалізація принципів 3D-концепції підтверджена прикладними розробками, зокрема захищеними патентом України № UA 129166 C2.

Здобувачка висловлює глибоку подяку доктору технічних наук, професору ДОБРОТВОРСЬКОМУ Сергію Семеновичу за надані консультації щодо розв'язання наукової проблеми, за цінні поради на окремих етапах теоретичних та практичних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на низці міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, зокрема: VI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції MicroCAD «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2017, 2019–2025); International Conference on Sustainable Smart Manufacturing (S2M 2019) (Манчестер, Велика Британія, 2019); International conference Manufacturing 2019 (Познань, Польща, 2019); Міжнародній науково-практичній конференції магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених» (м. Харків, 2019, 2020, 2022–2024); VII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2020, 2022); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» (м. Луцьк, 2020, 2022); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект» (м. Харків – м. Краматорськ, 2019, 2020; м. Харків – м. Краматорськ – м. Тернопіль, 2024); XX Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ – м. Тернопіль, 2022); X Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні PTME-2022» (м. Івано-Франківськ – м. Яремче, 2022); Міжнародній конференції «Розумні технології в міському господарстві» (м. Харків, 2023–2024); XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ–2024)» (м. Харків, 2024); Всеукраїнській конференції «Нові технології в машинобудуванні» (м. Харків, 2023–2025); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів-Звенів, 2023); International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) (Бухарест, Румунія, 2021–2025); International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE) (м. Суми, 2018; м. Луцьк, 2019; м. Харків, 2020; м. Львів, 2021; м. Познань, Польща, 2022; Високі Татри, Словаччина, 2023; м. Пльзень, Чехія, 2024; м. Порто, Португалія, 2025); International conference «Innovation in Engineering» (ICIE) (Азорські острови, Португалія, 2024; м. Прага, Чехія, 2025); Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner) (м. Одеса, 2019, 2024); II Міжнародній науково-теоретичній конференції «Моделювання і Комп'ютерний Інжиніринг в Машинобудуванні» (МСЕМЕ-2024) (м. Львів, 2024); EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice (ARTER) (Словаччина, 2023, 2025); та International Conference on Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems (SIEMS 2025) (м. Запоріжжя, 2025).

У повному обсязі дисертація доповідалася і схвалена на науковому семінарі кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Публікації. Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи опубліковані в 100 наукових працях, з них: 31 стаття (з них 15 – у наукових фахових виданнях України, 14 – у наукових періодичних виданнях інших держав, включених до науково-метричної бази Scopus та/або WoS; 2 – у зарубіжних періодичних спеціалізованих виданнях); 1 патент України на винахід; 1 – монографія у співавторстві; 1 розділ у колективній монографії у співавторстві; 20 – у збірниках

міжнародних конференцій, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або WoS; 46 – у матеріалах конференцій, що не індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або WoS.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 426 сторінок, з них основного обсягу – 332 сторінки (13,83 авт. арк.): 172 рисунки за текстом; 30 рисунків на 18 окремих сторінках; 20 таблиць за текстом; 4 таблиці на 3 окремих сторінках; список використаних джерел інформації з 303 найменувань на 42 сторінках; 5 додатків на 45 сторінках. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи – 311 сторінок (12,95 авт. арк.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтована актуальність проблеми і теми роботи, показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовані мета та напрямки її досягнення, наведені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, відзначені особистий внесок здобувача та результати апробації роботи.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено аналізу сучасного стану ТПВ малих і середніх підприємств в машинобудівній галузі в умовах малої дискретно-нестабільної серійності випуску продукції. Розглянуто особливості функціонування машинобудівних МСП, зростання складності конструкцій машинобудівних виробів і вимог до точності та якості поверхонь деталей машин і агрегатів, що, в свою чергу, вимагає від виробничих підприємств підвищення продуктивності та гнучкості виробництва. Встановлено, що традиційні підходи до ТПВ машинобудівної продукції передбачають тривалі цикли розроблення документації – від вибору технологічних процесів і проектування оснащення до розрахунку режимів оброблення та створення керуючих програм для верстатів з ЧПК. Це зумовлює значні витрати часу і ресурсів для прийняття та реалізації виробничих і технологічних рішень в умовах дискретно-нестабільної серійності виготовлення продукції та ускладнює технологічну гнучкість машинобудівних підприємств до змін попиту на ринку. Огляд відкритих джерел інформації, вітчизняних і міжнародних практик показав, що в умовах кризових ситуацій та швидких змін попиту на ринку, а відповідно, і вимог до гнучкості МСП і якості машинобудівної продукції в умовах критично малої серійності, саме тривалість і негнучкість традиційної технологічної підготовки стають основною перешкодою для забезпечення сталості та конкурентоспроможності МСП в умовах глобальних викликів. Доведено, що діалектичне протиріччя між високою продуктивністю виготовлення машинобудівної продукції, її якістю та технологічною гнучкістю виробництва потребує пошуку та застосування нових методів його подолання. Таким чином, у першому розділі обґрунтовано актуальність завдання підвищення ефективності ТПВ на основі впровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій, цифровізації та інтеграції багаторівневої 3D-інформації. Це визначає науково-методологічні засади подальших досліджень, спрямованих на створення концепції наскрізної 3D-цифрової підтримки життєвого циклу виробів як основи забезпечення технологічної сталості та конкурентоспроможності машинобудівних МСП.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено розвитку методології та теоретичних основ забезпечення технологічної та виробничої сталості

машинобудівних малих і середніх підприємств України в умовах дії стресових факторів. У роботі сформульовано гіпотезу, згідно з якою вирішальним чинником технологічної та виробничої сталості МСП є час прийняття та реалізації технологічних рішень. Встановлено, що саме швидкість адаптації технологічної підготовки виробництва машинобудівної продукції в умовах дискретно-нестабільного попиту визначає здатність підприємства зберігати структурну, технологічну та організаційну гнучкість МСП та їхню конкурентоспроможність у кризових ситуаціях.

Для теоретичного обґрунтування цієї гіпотези процес забезпечення сталого розвитку МСП подано у вигляді варіаційної похідної інтегрального функціонала (1).

$$SD(f) = \int_D L(x, f(x), f'(x), \dots, f^n(x)) dx, \quad (1)$$

де D - область визначення функції, яка може бути одно-, дво- або тривимірною, а L - функція багатьох аргументів, що характеризує узагальнені параметри сталості виробничої системи машинобудівного МСП.

У загальній формі такий інтегральний функціонал описує залежність від функції багатьох змінних та її похідних. Для практичного аналізу технологічної гнучкості область інтегрування D розглядається як часовий інтервал $[t_0, t_1]$, а функція $f(x)$ інтерпретується як векторна функція $f(t)$, компоненти якої описують основні параметри виробничої діяльності: якість продукції $Q(t)$, продуктивність процесів $P(t)$, ефективність управління запасами $E(t)$, інноваційну активність $I(t)$, відповідність стандартам $PC(t)$, рівень цифровізації $ID(t)$, візуалізацію процесів $V(t)$ та багаторівневу 3D-інформацію $3DI(t)$. У такій постановці функціонал набуває вигляду (2)

$$SD[f] = \int_{t_0}^{t_1} L(t, f(t), \dot{f}(t), \dots) dt, \quad (2)$$

що в подальшому було конкретизовано у векторній формі (3)

$$SD[f] = \int_D L(x, \bar{f}(x), \partial_i \bar{f}(x), \dots, \partial^n_{i_1, i_2, \dots, i_n} \bar{f}(x)) dx. \quad (3)$$

Такий підхід дозволив представити процес сталого розвитку МСП у багатовимірному просторі змінних і параметрів, де часовий чинник виступає основною координатою, що визначає фазовість технологічних і виробничих процесів.

Розглянуто особливості мінімізації функціонала сталого розвитку, який характеризує сукупний вплив часу, ресурсів і технологічних параметрів на ефективність виробничих процесів. У загальному вигляді задача мінімізації з обмеженнями записується як:

$$\min f(\bar{x}), \quad (4)$$

де \bar{x} – вектор змінних, що описують параметри технологічного процесу, а обмеження визначають допустимі межі зміни цих параметрів.

У роботі обґрунтовано, що управління часом має критичний вплив на всі ключові процеси ТПВ, а роль основного обмеження відіграє технологічна собівартість

продукції, яка не повинна перевищувати ринкову ціну. Це дало змогу сформулювати оптимізаційну задачу у вигляді (5):

$$\begin{cases} \min f(t) \\ PC_{max} < MP \end{cases}, \quad (5)$$

де PC_{max} – максимально допустима технологічна собівартість, MP – ринкова ціна виробу. Оскільки складові функціонала не мають жорстких обмежень, розв'язання задачі здійснювалося з урахуванням м'яких технологічних обмежень (soft constraints), реалізованих на засадах методу автоматичного планування на основі переваг (Preference-Based Planning, PPLAN). У цьому випадку функціонал набуває узагальненого вигляду (6):

$$SD(f) = \int_D L(t, f(t)) dt, \quad (6)$$

що дозволяє враховувати часову адаптивність гнучкої виробничої системи до зовнішніх стресових впливів.

Враховуючи гіпотезу про вирішальну роль часу як керуючого параметра технологічної сталості машинобудівних МСП в умовах стресу, функціонал сталого розвитку з урахуванням цифровізації конкретних параметрів набув вигляду (7):

$$t = \int_0^{t_{end}} \frac{P(t) \cdot t_i(t)}{I_{eff}(t) \cdot \sum_1^n D(t) \cdot (E_{персонал}(t) + E_{технології}(t) + E_{додаткові}(t))} dt, \quad (7)$$

де параметри описують поточну продуктивність, ефективність використання ресурсів, динаміку цифровізації та витрати часу й ресурсів на персонал і технології.

Уведення граничної умови технологічної собівартості у вигляді

$$PC(t) = E_{персонал}(t) + E_{технології}(t) + E_{додаткові}(t) \leq PC_{max}, \quad (8)$$

забезпечило рентабельність і технологічну сталість виробництва машинобудівної продукції, а узагальнена цільова функція з урахуванням часових і ресурсних обмежень тепер була записана як (9):

$$\begin{cases} \min \left(\frac{P(t) \cdot t_i(t)}{I_{eff}(t) \cdot \sum_1^n D(t) \cdot (E_{персонал}(t) + E_{технології}(t) + E_{додаткові}(t))} \right) \\ PC(t) < PC(t)_{market} \end{cases}. \quad (9)$$

На основі отриманих залежностей розроблено інтегральний функціонал гнучкості (10), який описує часову динаміку параметрів технологічної сталості та дозволяє кількісно оцінювати адаптивність та гнучкість машинобудівного МСП:

$$F = \int_0^{T_0} [\sigma_1 \cdot Q(t) + \sigma_2 \cdot P(t) + \sigma_3 \cdot E(t) + \sigma_4 \cdot In(t) + \sigma_5 \cdot CR(t) + \sigma_6 \cdot ID(t) + \sigma_7 \cdot V(t) + \sigma_8 \cdot 3DI(t)] dt \rightarrow \min. \quad (10)$$

У подальшому модель сталого розвитку МСП було розширено шляхом урахування впливу стресових факторів зовнішнього середовища, що зумовлюють коливання сталості, а відповідно і основних параметрів функціонала. До таких факторів віднесено: зміну попиту $\Delta Demand(t)$, зміну пропозиції $\Delta Supply(t)$ та вплив часткової або повної релокації виробництва $\Delta Relocation(t)$, що відображають витрати та зміни технологічних зв'язків під час переміщення потужностей. Крім того,

до моделі введено коефіцієнти ξ_1 і ξ_2 , які характеризують узагальнений вплив форс-мажорних умов (військових дій, перебоїв енергопостачання, втрати персоналу тощо) на гнучкість МСП. У результаті функціонал набуває вигляду (11):

$$F_{total} = \int_0^{T_0} [\sigma_1 \cdot Q(t) + \sigma_2 \cdot P(t) + \sigma_3 \cdot E(t) + \sigma_4 \cdot In(t) + \sigma_5 \cdot CR(t) + \sigma_6 \cdot ID(t) + \sigma_7 \cdot V(t) + \sigma_8 \cdot 3DI(t)] dt + \int_0^{T_0} [\xi_1 (\Delta Demand(t) + \Delta Supply(t)) + \xi_2 \cdot \Delta Relocation(t)] \rightarrow \min \quad (11)$$

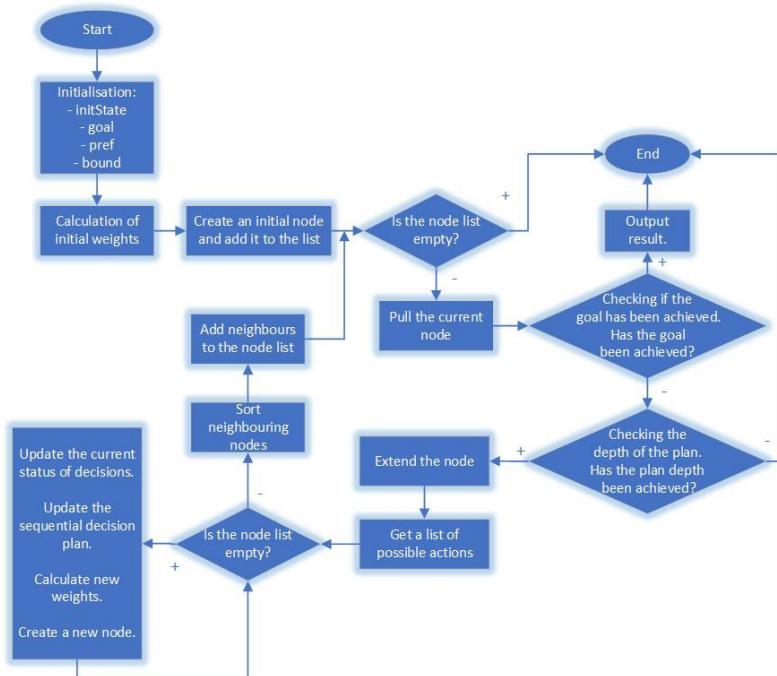


Рисунок 1 – Алгоритм оптимізації інтегрального функціонала гнучкості МСП методом автоматичного планування на основі переваг (PPLAN)

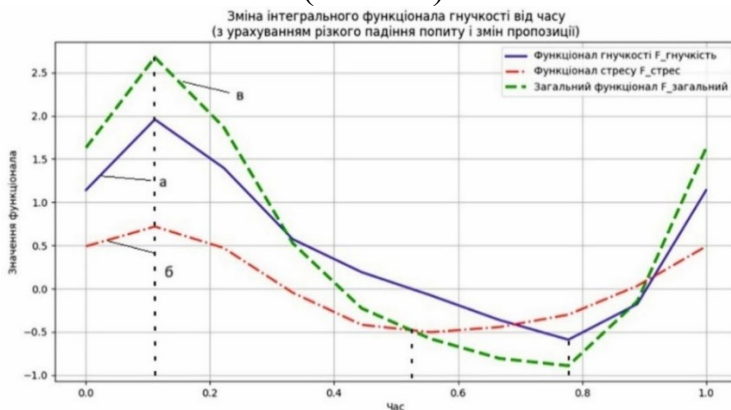


Рисунок 2 – Аналіз впливу стресових факторів на технологічну сталість МСП (нормалізований часовий цикл адаптації від 0 до 1)

технології забезпечують стабілізуючий вплив, функціонуючи у протифазі до основних параметрів виробництва, таких як продуктивність, якість продукції та ефективність управління запасами. Показано, що саме компоненти цифровізації та 3D-інформації дозволяють компенсувати втрати технологічної сталості виготовлення машинобудівної продукції, що підтверджено результатами нормалізованого аналізу

В межах проведеного дослідження застосовано варіаційне числення та методи оптимізації для оцінки стійкості функціонала у часі. Оптимізацію інтегрального функціонала здійснювали методом автоматичного планування на основі переваг (PPLAN), що забезпечив пошук варіативних антистресових рішень у режимі реального часу. Такий метод оптимізації дав можливість визначати пріоритетність впливових параметрів та швидко генерувати множину рішень у кризових умовах.

Розроблено алгоритм роботи програми обчислення оптимізації функціонала гнучкості машинобудівних МСП в умовах стресу (рис. 1), що реалізовано у вигляді програмного коду на мові Java. Результати аналізу часової динаміки функціонала гнучкості МСП наведено на рисунках 2 та 3.

Встановлено, що в умовах зростання стресових навантажень відбувається зниження гнучкості виробничої системи, однак цифрові 3D-

(рис. 4). Теоретично досліджено вплив окремих стресових факторів, зокрема дискретно-нестабільних коливань попиту та вимушеної релокації виробничих потужностей. Встановлено, що саме релокація спричиняє найруйнівніший ефект для

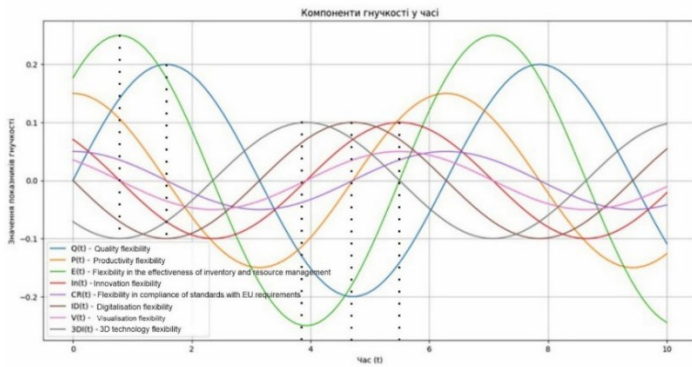


Рисунок 3 – Аналіз часової динаміки компонентів інтегрального функціонала гнучкості МСП



Рисунок 4 – Аналіз впливу стресових факторів на поведінку загального функціоналу гнучкості в часі

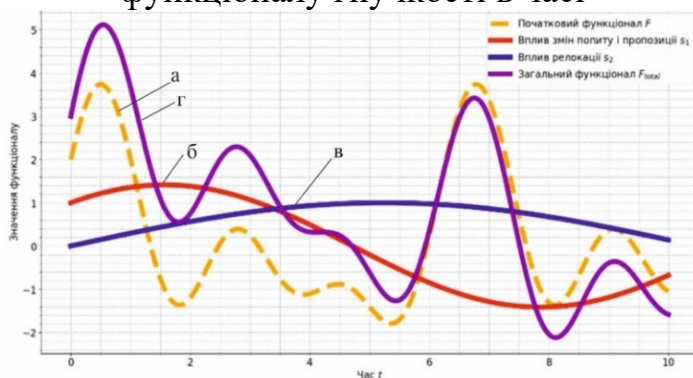


Рисунок 5 – Інтегральний функціонал гнучкості із урахуванням Force Majeure обставин: F – інтегральний функціонал гнучкості МСП, s_1 – вплив зміни попиту і пропозиції на гнучкість МСП, s_2 – вплив релокації на гнучкість МСП, F_{total} – загальний функціонал

ТПВ та виготовлення машинобудівної продукції, оскільки змінює організаційно-

технологічну структуру підприємства. Це обумовлено тим, що свого максимуму та мінімуму він досягає значно раніше за інші стресові фактори (рис.4 – зелена крива), це і характеризує його різкіший вплив. Водночас доведено, що цифрова адаптивність, яка базується на інтеграції функцій цифровізації ТПВ, візуалізації даних та застосуванні змінних 3D-представлень деталей та складальних одиниць, дозволяє швидко нейтралізувати дестабілізуючі фактори.

Подальший аналіз (рис. 5) демонструє фазову кореляцію між цифровими параметрами 3D-моделей, часовими характеристиками технологічних процесів та загальним рівнем технологічної сталості підприємства. На основі цих результатів виявлено, що при зростанні амплітуди коливань попиту на машинобудівну продукцію фазовий зсув цифрової інформації відносно основних виробничих параметрів забезпечує часткову компенсацію втрат ефективності. Це підтверджує, що впровадження наскрізної 3D-цифровізації дозволяє адаптивно стабілізувати ТПВ, скоротити час реагування на стресові впливи та підтримувати сталий режим роботи МСП навіть у періоди кризових змін. Таким чином, у другому розділі обґрунтовано, що головним чинником сталості машинобудівних МСП є мінімізація

часу в ТПВ, а ключовим інструментом підвищення гнучкості виступає цифрова 3D-інформація, яка виконує стабілізуючу функцію в умовах кризових впливів. Запропонована методологія оптимізації інтегрального функціонала гнучкості методом планування RPLAN підтвердила можливість адаптації технологічних процесів у режимі реального часу, забезпечуючи сталість виробництва навіть за умови критично малої дискретно-нестабільної серійності.

У **третьому розділі** визначено, обґрунтовано та розвинуто багаторівневу 3D-концепцію підвищення технологічної сталості МСП в умовах малої дискретно-нестабільної серійності. Суть цієї концепції полягає у вертикальній та горизонтальній інтеграції цифрових даних про об'єкт виробництва – від нано- до глоборівня – у вигляді цифрових моделей, цифрової інформації та оцифрованих фізичних характеристик реальних об'єктів виробництва (рис.6). Такий підхід забезпечує безперервний зв'язок між різними масштабами технологічних процесів і дозволяє здійснювати моніторинг стану об'єкта виробництва у реальному часі.

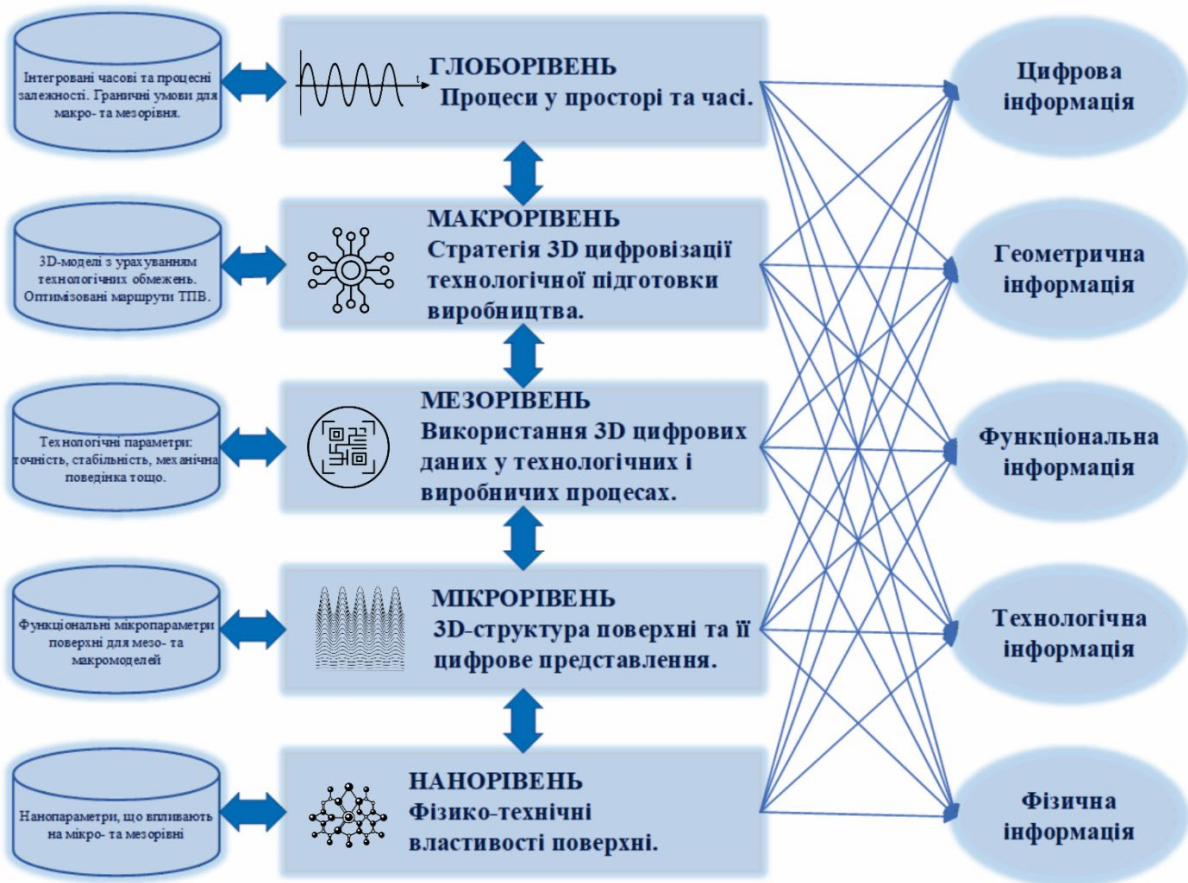


Рисунок 6 – Структурно-логічна схема інтеграції цифрових даних про об'єкт виробництва у межах 3D концепції

Визначено, що вертикальна інтеграція в межах концепції описує рух даних «знизу вгору» – від наноструктури до глобальної моделі виробу, тоді як горизонтальна інтеграція забезпечує об'єднання цифрових потоків між різними підрозділами підприємства, технологічними етапами виготовлення виробів і програмними модулями (цифровими сервісами). Схематичне представлення рівнів і

потоків інформації наведено на рис.6, де показано взаємодію п'яти рівнів: нано-, мікро-, мезо-, макро- та глоборівня, з вказівкою параметрів інформаційної інтеграції між ними та завданнями технологічної підготовки виробництва.

Запропонована 3D-концепція дозволяє формувати об'єднану інформаційну модель об'єкта виробництва, що містить не лише геометричні параметри виробу, але й дані про його реальні фізичні характеристики, технологічні режими оброблення, параметри процесів і результати контролю. Такий підхід забезпечує динамічний моніторинг стану виробу і можливість прийняття швидких технологічних рішень для оптимізації технологічної підготовки виробництва машинобудівної продукції в умовах малої дискретно-нестабільної серійності та формування засад сталості малих і середніх машинобудівних підприємств в умовах глобальних викликів.

Інтеграція принципів 3D-концепції у технологічну підготовку виробництва здійснена через створення єдиної цифрової платформи JavaMach Cluster, яка поєднує науку, освіту й виробництво у єдину цифрову екосистему забезпечення сталості МСП.

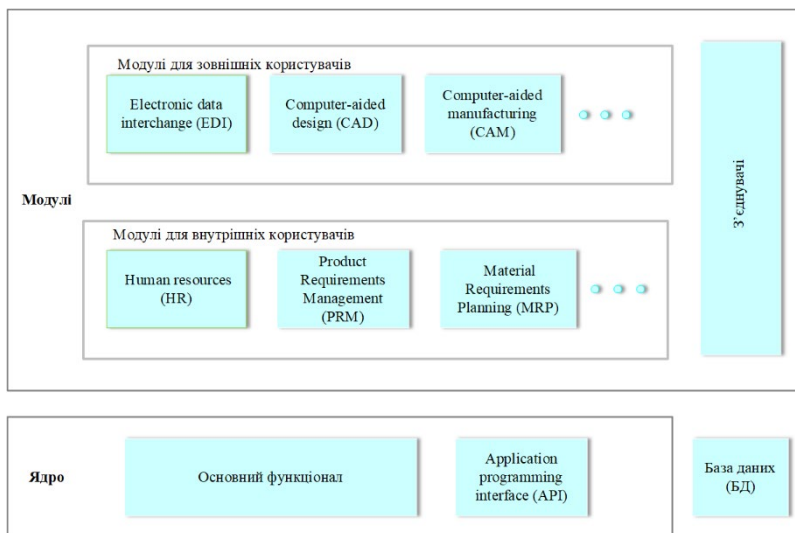
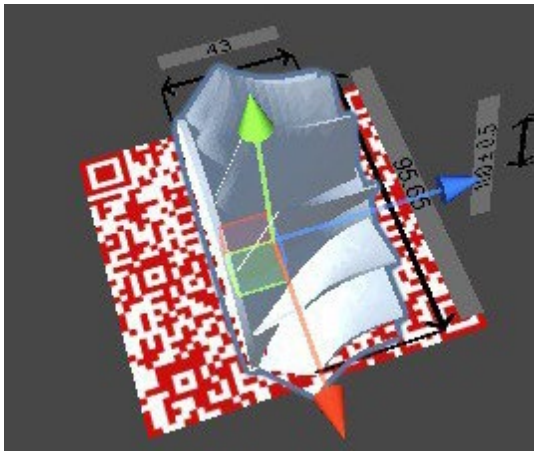


Рисунок 7 – Структура модульної системи планування ресурсів підприємства

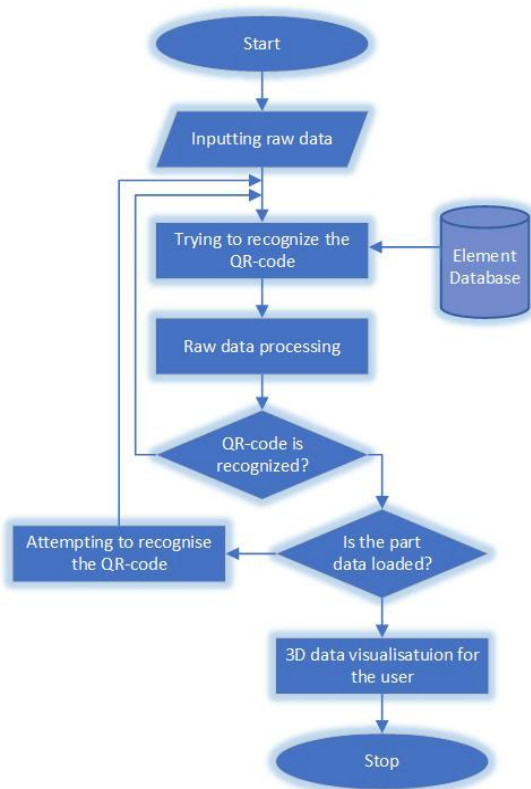
У структурі платформи розроблено модульну ERP-систему з відкритою архітектурою (рис. 7), що інтегрує CAD/ CAE/ CAM/ CAPP/ PLM-системи і додаткові цифрові модулі у відповідь на поточну потребу МСП. Це дозволило сформувати наскрізний цифровий простір технологічної підготовки виробництва машинобудівної продукції – від вибору матеріалу до контролю маршруту деталей у виробничому циклі

виготовлення, що здатний невілюювати впливи зовнішніх стресів: зміни попиту і пропозиції або Force Majeure ситуацій типу повної або часткової релокації виробництва. Для практичної реалізації 3D-концепції у системі технологічної підготовки виробництва було розроблено відкриті програмні модулі для 3D-інтеграції даних про об'єкт виробництва. Зокрема, створено модуль ERP-системи для керування матеріалами та великими даними з відкритою структурою на основі .NET-технологій, орієнтований на потреби малих машинобудівних виробництв. Цей модуль забезпечує інтеграцію інформації про властивості матеріалів, режими механічної обробки, ресурси обладнання та дозволяє автоматично формувати технологічні карти і рекомендації для маршрутів виробництва.

Окремо розроблено базу даних для механічної обробки сортаменту з можливістю редагування властивостей матеріалу, пошуку за хімічним складом, технологічними параметрами процесу та історією використання.



а



б

Рисунок 8 – Блок-схема проекту 3D-візуалізації продукту ланцюга постачання

Це дозволило створити замкнуту систему зворотного зв'язку між проектуванням і технологічною підготовкою виробництва, що відповідає принципам «digital thread». На наступному етапі у межах 3D-концепції запропоновано методику інтеграції QR-коду з 3D-інформацією, яка дає змогу візуалізувати тривимірну модель виробу разом із технологічними параметрами у реальному часі. Мобільний додаток (Android) зчитує QR-код і автоматично підвантажує з бази даних 3D-модель виробу з набором супровідних параметрів – матеріалом, режимами обробки, інструментом, маршрутом виготовлення (рис. 8а). Ця система реалізує динамічне оновлення даних під час виконання технологічних операцій і дозволяє скоротити міжопераційні простоя у виробничому процесі. Розроблена QR-система підтримує навчання на основі накопичених даних, що дозволяє автоматично адаптуватися до повторюваних ситуацій у виробництві. Алгоритм самонавчання QR-системи наведено на рис.8б. Це рішення забезпечує швидку ідентифікацію об'єктів і можливість адаптивного керування технологічними процесами виготовлення продукції. Практичну ефективність запропонованих рішень підтверджено на прикладі деталі типу Mixed-Flow Turbine, яка є складним об'єктом для обробки через наявність криволінійних поверхонь і складну геометрію лопаток. На основі CAD-моделі було створено високоточну 3D-модель робочого елемента турбіни, інтегровану у

цифровий ланцюг постачання. Візуалізація виробу здійснювалась за допомогою системи Vuforia Engine, яка дозволила поєднати геометричну інформацію з виробничо-технологічними параметрами у спільному цифровому просторі. У виробничому середовищі проведено експериментальне тестування роботи системи, де модуль 3D-візуалізації інтегрувався з системою управління матеріальними та інформаційними потоками. Крім того, в межах концепції визначено роль цифровізації у забезпеченні сталого розвитку МСП у парадигмі Індустрії 4.0. Запропоновано модель підготовки кадрів нової генерації – системних інтеграторів, здатних працювати з великими даними, IoT, хмарними технологіями, 3D-моделюванням і адитивними процесами.

Таким чином, у третьому розділі розвинено теоретичні й методологічні засади 3D-концепції забезпечення технологічної сталості МСП, створено інструментарій її практичної реалізації, включно з платформою JavaMach Cluster, модульними ERP-рішеннями та мобільними додатками для інтеграції 3D-інформації. Проведені дослідження довели ефективність запропонованого підходу у підвищенні технологічної адаптивності, стійкості та конкурентоспроможності малих і середніх машинобудівних підприємств України в умовах стресу.

У четвертому розділі дисертації розвинуто та реалізовано стратегію використання 3D-цифровізації та багаторівневої 3D-інформації на мезо- і макрорівні технологічної підготовки виробництва машинобудівних компонентів, спрямовану на підвищення адаптивності малих та середніх виробництв до хвильових коливань ринку. Обґрунтовано доцільність інтеграції цифрових двійників, інженерних рішень та візуальної 3D-інформації у технологічні ланцюги створення високотехнологічної продукції, що дозволяє мінімізувати час реакції виробництва на зміну попиту. Запропоновано впровадження інструментів 3D концепції в принципово новий технологічний ланцюжок створення високоінтелектуальної машинобудівної продукції типу вузлів і агрегатів у відповідь на поточний попит ринку (рис. 9).

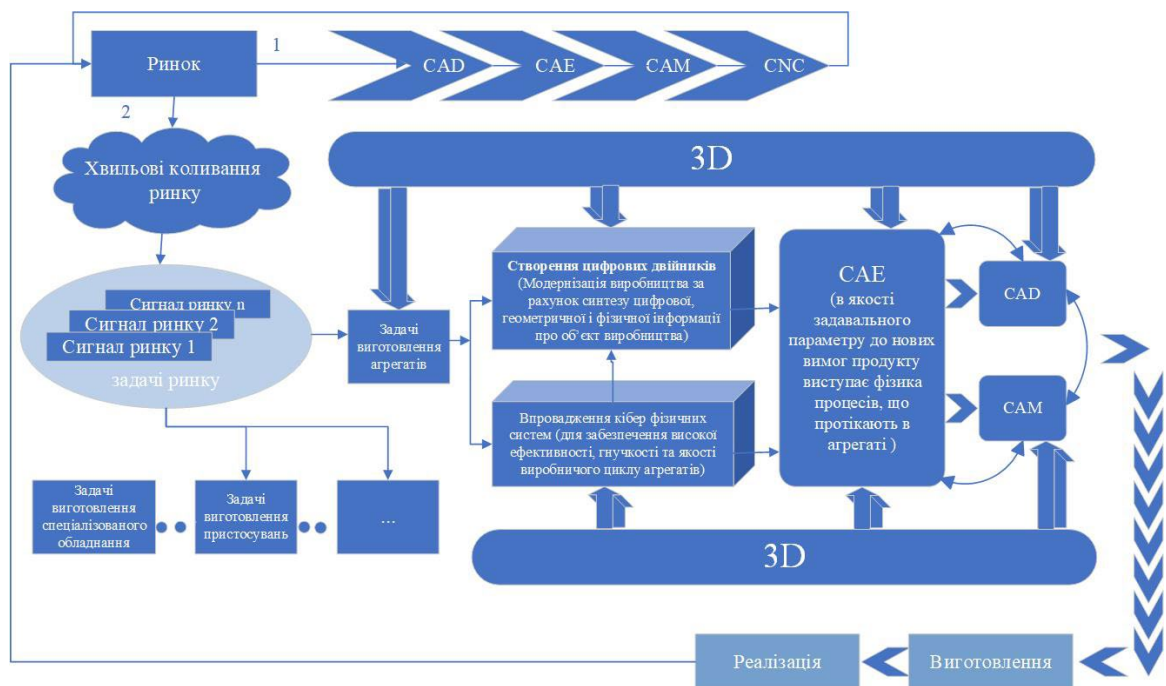


Рисунок 9 – Роль 3D концепції в технологічному ланцюжку створення високоінтелектуальної машинобудівної продукції: 1 – шлях розроблення нової продукції або окремих деталей; 2 – шлях модернізації характеристик виробу у відповідь на поточний попит ринку

Основний акцент зроблено на побудові нового технологічного ланцюжка виготовлення агрегатів типу турбокомпресорів, де цифрова 3D-модель є ключовим елементом прийняття інженерних рішень.

Показано, що на відміну від традиційних підходів, запропонована послідовність технологічної підготовки виробництва передбачає винесення рівня «інженерних рішень» (CAE) на перший план та його інтеграцію з цифровими двійниками та кіберфізичними системами. Це забезпечує не лише швидке перепроєктування

виробів, а й адаптивність конструкцій до змін ринку. Особливу увагу приділено оптимізації фізичних процесів у ключових вузлах агрегату: аеродинаміки, теплообміну та розподілу навантажень, що визначають точність, жорсткість та енергоефективність кінцевого продукту. Реалізація стратегії продемонстрована на прикладі турбокомпресора для двигунів внутрішнього згоряння з урахуванням тенденцій переходу на водневе паливо та екологічних вимог. Виконано аналіз конструктивних особливостей турбін осьового, радіального та змішаного потоку, що показав переваги змішаного потоку з точки зору коефіцієнта корисної дії (ККД) та адаптації до змін режимів роботи. Залежність між коефіцієнтом швидкостей та тиском описано формулою $\frac{U}{C_{is}} = \frac{U}{\sqrt{2c_p T_{oinlet} [1 - (\frac{P_{exit}}{P_{oinlet}})^{(\gamma-1)/\gamma}]}}$, що визначає умови

ефективної роботи турбіни при високому відношенні тисків. Детально розроблено методологію проєктування лопаток турбіни на основі цифрового інжинірингу, що включає використання профілів NASA-65, DCA, MCA та CD залежно від числа Маха (M). Математичну основу становлять формули $F = \rho V_\infty \times \Gamma$; $\gamma(x) = \frac{d\Gamma}{dx}$;

$$\Gamma = \int_0^c \gamma(x) dx; x_c = \frac{x}{c} c, y_c = \frac{y}{c} c; \frac{t}{c} = \left(\frac{t}{c}\right)_{ref} \frac{\left(\frac{t}{c}\right)_{max}}{\left(\frac{t}{c}\right)_{max_ref}}; \left. \begin{array}{l} x = x_c - \left(\frac{t}{2}\right) \sin v \\ y = y_c - \left(\frac{t}{2}\right) \sin v \end{array} \right\} \text{що описують}$$

циркуляцію потоку, лінію вигину лопатки та накладання базового профілю. Цей підхід дозволив варіювати геометрію та аеродинамічні характеристики профілю з урахуванням режимів експлуатації, що є критичним для швидкої адаптації виробництва в умовах змінного попиту. На наступному етапі дослідження проведено CFD-аналіз (Computational Fluid Dynamics) для чисельного моделювання потоків у турбіні змішаного потоку з використанням рівнянь Нав'є-Стокса $\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho \cdot dv + \iint \rho V \cdot dA = 0$, $\iint (\rho V \cdot dA) V + \iiint \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} \cdot dv = \iiint \rho f \cdot dv - \iint p \cdot dA$, $\iiint q \rho \cdot dv - \iint p V \cdot dA + \iiint \rho(f \cdot V) dv = \iiint \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] dv + \iint \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) V \cdot dA$, $p = \rho RT$, а також RANS-моделі та моделі турбулентності k-ε: $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$, $-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho_k$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon$, $\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon)$. Для замикання системи рівнянь були задані початкові та граничні умови, що відповідають фізичним умовам реального експерименту. На вхідній границі розрахункової області (вхід турбіни) задавались параметри потоку у вигляді повного тиску p_{entr} , температури T_{entr} та кута підведення потоку α_{entr} , що відповідали трьом основним режимам обертання ротора – 50 %, 75 % та 100 % від номінальної швидкості. На вихідній границі (за турбіною) фіксувався статичний тиск p_{ex} при ізентропічному перебігу процесу. Для твердих стінок лопаток і корпусу турбіни застосовувались умови непроникності та прилипання ($u = 0$, $v = 0$) із тепловою ізоляцією ($\partial T / \partial n = 0$). На осі симетрії було встановлено умови симетрії ($u_n = 0$, $\frac{\partial u_t}{\partial n} = 0$, $\partial T / \partial n = 0$), що забезпечувало коректність розрахунків для осесиметричної моделі. Початкові умови відповідали

стаціонарному розподілу параметрів потоку в момент часу $t = 0$: $\rho = \rho_0$, $U = U_0$, $T = T_0$. Для створення цифрового двійника турбіни застосовано гексаедричну сітку. Показано, що стабілізація ізентропічного ККД досягається при кількості елементів понад 333372, а верифікація моделі підтверджена експериментальними даними. Отримано просторові розподіли статичного тиску та швидкості в зоні міжлопастевих каналів (рис. 10 - рис.12), що дали змогу виявити зони рециркуляції та нерівномірності навантаження на лопатку. Проведено параметричний аналіз впливу кута відхилення лопаток (-10° , -15° , -20° , -25° , -30° , -35°) на вихідну роботу, потужність і коефіцієнт розширення ротора.

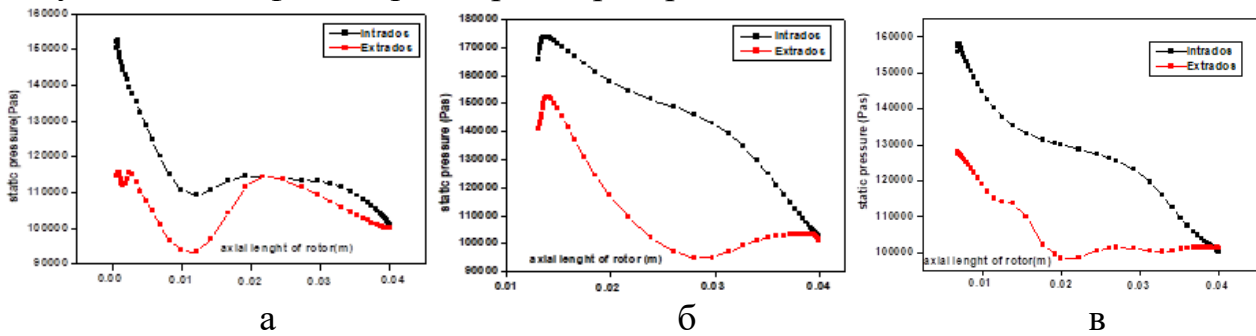


Рисунок 10 - Розподіл статичного тиску навколо профілів лопатки: а - статичний тиск поблизу маточини; б - статичний тиск поблизу кожуха; в - статичний тиск на середньому радіусі

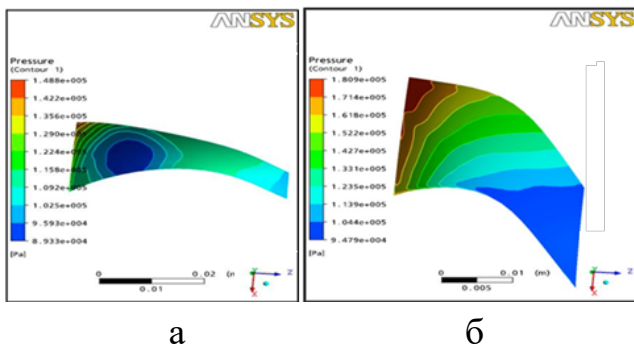


Рисунок 11 – 3D-аналіз контуру статичного тиску: а - поблизу маточини; б - поблизу кожуха

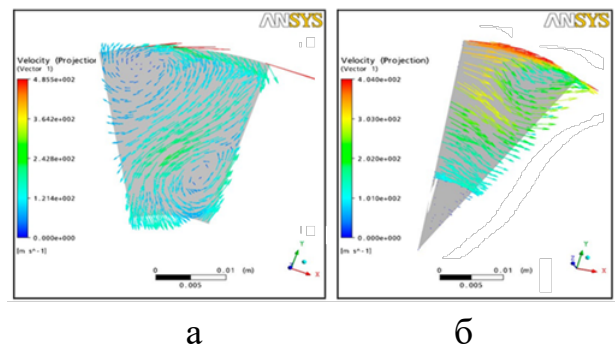


Рисунок 12 – 3D-аналіз поля відносної тангенціальної швидкості: а - у зоні входу в ротор; б - у зоні виходу з ротора

Встановлено, що збільшення кута відхилення позитивно впливає на потужність при 100 % навантаженні, але не є лінійним для нижчих навантажень. Аналіз зміни відносного числа Маха при різних режимах обертання (50 %, 75 %, 100 %) показав, що потік у звужувально-розширювальному каналі між лопатками перебудовується без зриву обтікання (рис. 13). Це свідчить про адаптивну поведінку потоку – прикордонний шар залишається стабільним на поверхні лопатки, що забезпечує рівномірний розподіл швидкості й тиску при зміні режимів роботи турбіни. Розподіл статичного тиску навколо профілю лопаток (рис. 14) підтвердив, що зі збільшенням кута відхилення лопатки від осевого напрямку потоку спостерігається зростання навантаження на напірній стороні профілю та більш рівномірний розподіл тиску, що позитивно позначається на ефективності роботи ротора.

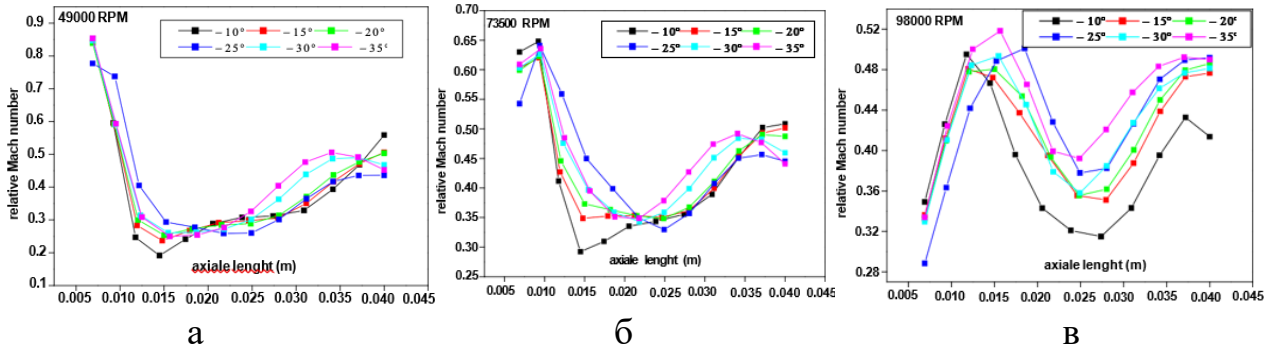


Рисунок 13 – Розподіл відносного числа Маха в звукувально-розширювальному каналі турбіни при різних режимах обертання турбінного колеса: а – 50%; б – 75%; в – 100%.

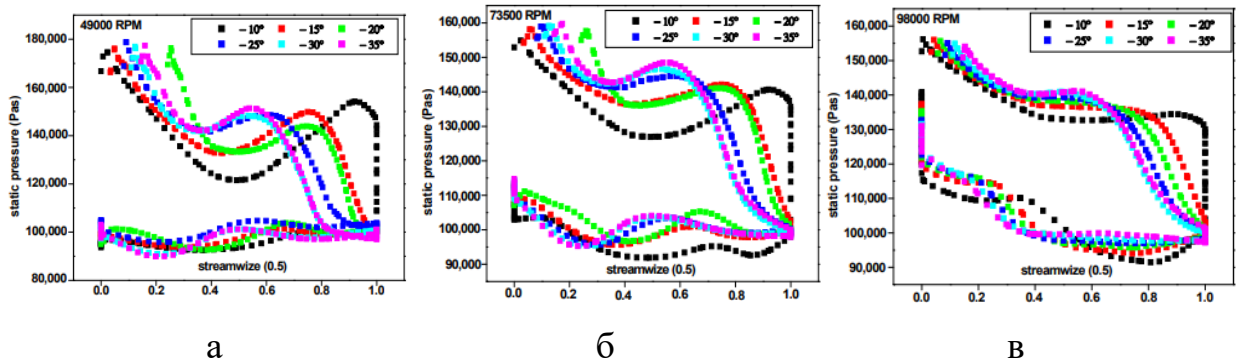


Рисунок 14 - Розподіл статичного тиску на профілі лопатки турбіни при зміні кута відхилення потоку, що визначає оптимальні умови аеродинамічного навантаження: а – 50%; б – 75%; в – 100%.

Встановлено, що ізентропічний ККД турбіни зростає зі збільшенням кута відхилення лопаток ротора при 75 % та 100 % навантаження, що вказує на можливість адаптації геометрії лопаток до конкретних режимів експлуатації без зміни габаритних розмірів (рис. 15). Таким чином, цифрове моделювання та 3D-аналітика дозволили визначити оптимальні параметри конструкції турбіни змішаного потоку, що забезпечують підвищення енергоефективності та скорочення часу перепроєктування виробу.

Окрім оптимізації конструктивних параметрів елементів газодинамічного тракту, додатково проведено 3D-дослідження збірки турбінного вузла, спрямовані на оцінку впливу технологічних відхилень на роботу турбокомпресора в різних експлуатаційних режимах (рис.16). Дослідження виконувалися з використанням тривимірного CFD-моделювання газодинамічних параметрів потоків повітря при швидкості обертання робочого колеса 50 %, 75 % та 100 % від номінального режиму.

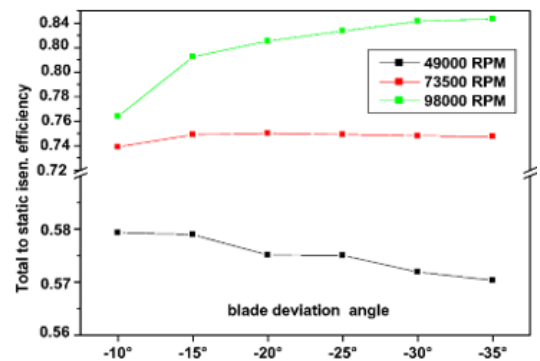


Рисунок 15 - Ізентропічний ККД (від загального до статичного) для різних кутів відхилення лопатки

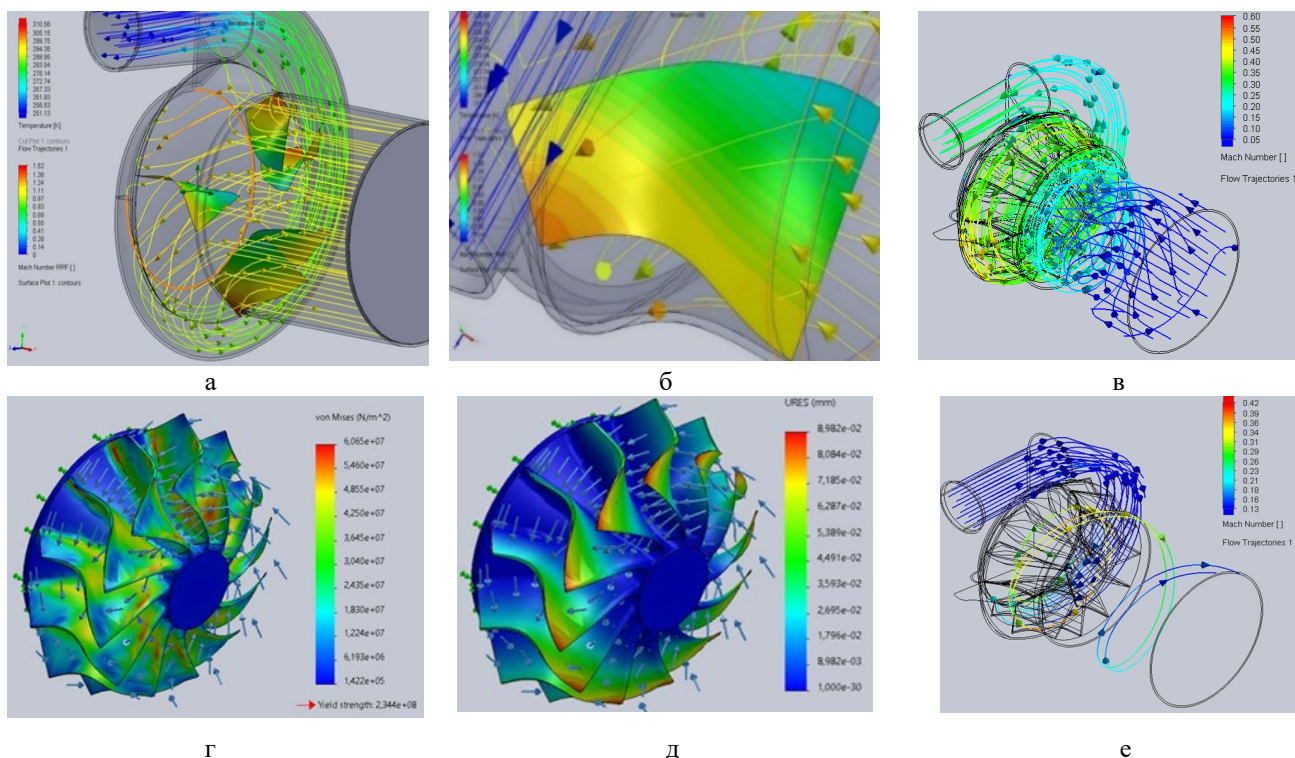


Рисунок 16 – 3D-аналіз розподілу потоків та температури повітря в компресорному й турбінному колесах: а,б,в – розподіл температур і швидкостей потоку повітря в компресорі; г,д,е – розподіл напружень та деформацій на лопатках та швидкостей потоку повітря в турбіні

В п'ятому розділі дисертації розвинуто та реалізовано стратегію використання 3D-цифровізації та багаторівневої 3D-інформації на мікро- і нанорівні технологічної підготовки виробництва машинобудівних компонентів, спрямовану на підвищення адаптивності малих та середніх виробництв до хвилювих коливань ринку та дії зовнішніх стресових факторів. Комп'ютерне моделювання застосовувалося для аналізу деформацій, динамічних характеристик та вібрації тонкостінних конструкцій, зокрема лопаток турбін з консольним закріпленням та з бандажною полицею, а також колінчатих валів (рис.17). Для лопаток турбін було виконано моделювання методом скінченних елементів у програмних комплексах ANSYS, Abaqus та SolidWorks. Дослідження включало модулі Structural Analysis (аналіз напружень та деформацій), Modal Analysis (дослідження частот власних коливань) та Harmonic Response Analysis (аналіз гармонійної відповіді).

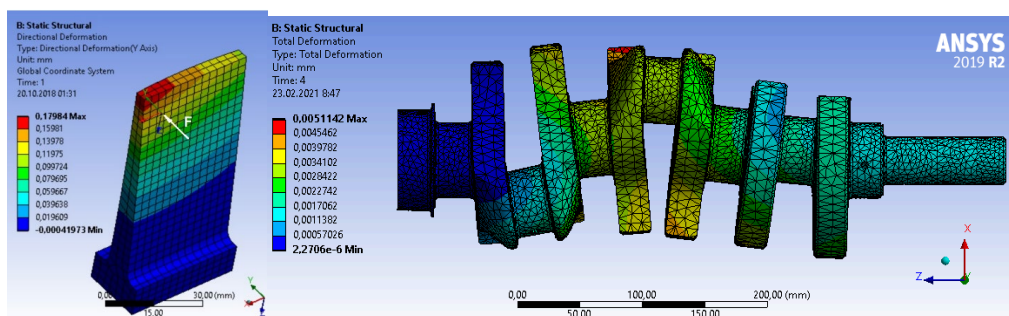


Рисунок 17 – Деталі-представники 3D-аналізу деформацій, динамічних характеристик та вібрацій тонкостінних конструкцій

Було визначено власні частоти конструкції та побудовано амплітудно-частотні характеристики для різних режимів фрезерування (рис.18). Досліджено вплив способу закріплення лопатки при фрезеруванні пера і спинки лопаток на спектри власних частот та амплітуду коливань. Встановлено, що умови закріплення в технологічному пристрої (наприклад, в лещатах) суттєво відрізняються від робочого кріплення в турбінному

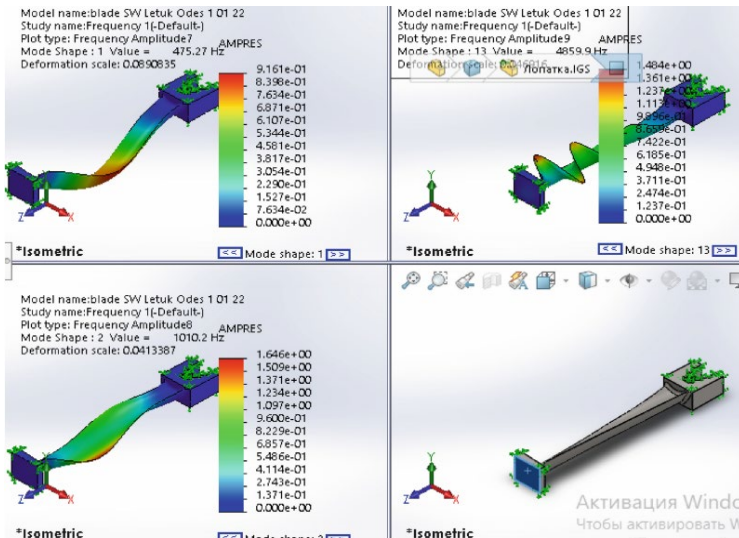


Рисунок 18 – 3D аналіз розподілу амплітуди і моди власної частоти лопатки

проводилися на матеріалах, критично важливих для авіаційно-космічної та енергетичної галузей машинобудування: титановому сплаві Ti-6Al-4V та нержавіючій сталі AISI 321.

Для комплексної оцінки мікротопографії поверхні використовувалася цифрова оптична 3D мікроскопія та атомно-силова мікроскопія, що дозволило отримати багатопараметричне представлення шорсткості (24 параметри) за стандартом ISO 25178, включаючи параметри висоти (S_a , S_z , S_q , S_p , S_v , S_{10z} , S_{sk} , S_{ku}), а також просторові (S_{al} , S_{tr} , S_{td}), функціональні (S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{mr1} , S_{mr2} , V_{mp} , V_{mc} , V_{vv} тощо) та гібридні (S_{dq} , S_{dr} , S_{ds}) параметри. Мікроструктура досліджених поверхонь представлена в оцифрованому вигляді та збережена у вигляді цифрових баз даних, що забезпечує можливість автоматизованого порівняльного аналізу, відстеження змін параметрів у часі та використання цих даних у рамках єдиного цифрового простору 3D-концепції технологічної підготовки виробництва. Було експериментально досліджено явище технологічної спадковості шорсткості поверхні

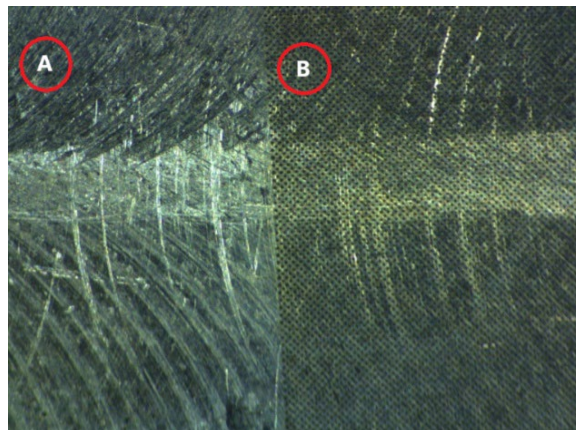


Рисунок 19 – Поверхня зразка титаново сплаву Ti-6Al-4V після двостадійної обробки: а – після фрезерування кінцевою фрезою перед лазерним текстуруванням; в – після лазерного текстурування фемтосекундним лазером

було визначено вплив способу закріплення заготовки при проектуванні технологічного процесу оброблення таких деталей.

Комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на глибокий аналіз якості та функціональних властивостей поверхневого шару деталей машин на мікро- і нанорівні було проведено паралельно із комп'ютерним моделюванням. Дослідження

на мікрорівні під час двостадійного оброблення методами фрезерування та лазерного текстурування (рис.19).

Встановлено, що початкова мікротопографія поверхні (шорсткість та мікродефекти), сформована фрезеруванням, критично впливає на рівномірність та якість подальшого формування лазером періодичних мікро- і наноструктур (LIPSS-лазер-індукованих періодичних поверхневих структур) (рис.20, рис. 22).

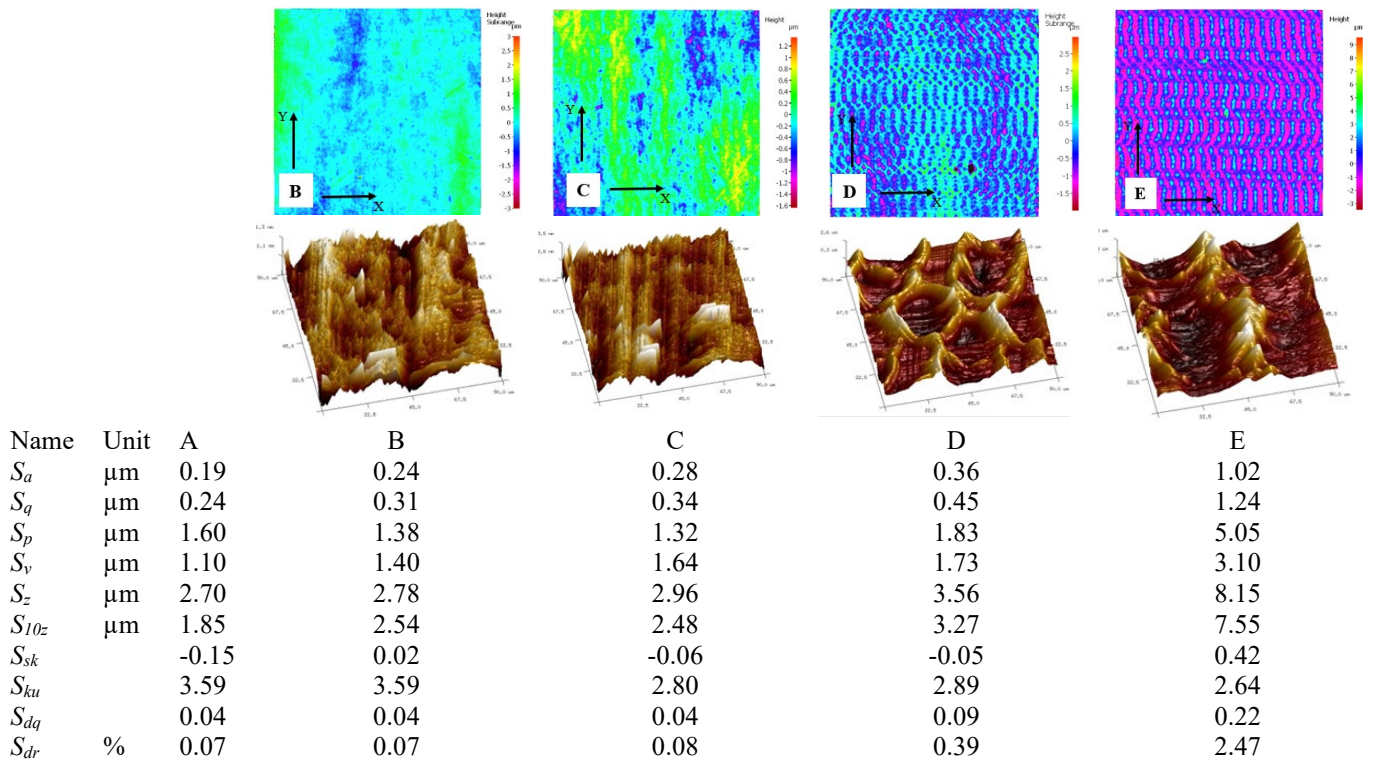


Рисунок 20 – Поверхнева структура сталі AISI321: а – не текстурована; б-е – текстурована з різними технологічними режимами

Чисельна оптимізація параметрів фрезерування (радіусу закруглення ріжучої кромки, подачі на зуб) методом BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), різновидом методу градієнтного спуску, дозволила мінімізувати середню шорсткість (R_a) до ~ 0.25 мкм, що відповідало оптимальному базовому стану поверхні для подальшого формування лазером рівномірних LIPSS. Таким чином було доведено необхідність розгляду технологічного процесу як єдиного ланцюга, де параметри на мікрорівні (сили різання, вібрації) безпосередньо формують мікротопографію, яка, в свою чергу, визначає успішність операцій поверхневого структурування на нанорівні, тобто формування рівномірних, передбачуваних і функціональних мікро- і наноструктур.

Розроблено нову стратегію фрезерування поверхні лопаток, яка на мікрорівні враховує силові і частотні параметри (рис.21). Вона містить новий підхід до обробки тонкостінних елементів, що заснований на локалізації небезпечних зон оброблення та адаптації технологічних параметрів різання до цих зон. Замість традиційної стратегії з постійними параметрами різання по всій поверхні, запропоновано виявляти, за допомогою МСЕ-моделювання, небезпечні зони (за ізолініями рівних деформацій та власних частот) і програмно змінювати (адаптувати) в них технологічні параметри (наприклад, подачу), щоб уникнути резонансних явищ і забезпечити рівномірну

якість поверхні. На мікрорівні встановлено явище технологічної спадковості для низьких мод коливань (1-ша, 2-га, 4-та), які зберігаються на всіх технологічних етапах обробки лопатки. Виявлено кореляцію між формою розподілу амплітуд власних коливань та формою розподілу деформацій під навантаженням від різального інструменту в процесі механічного оброблення (полірування, шліфування), що дозволило ефективно прогнозувати небезпечні зони. Нова стратегія фрезерування на мезорівні дозволила досягти значного зменшення амплітуди коливань і уникнути резонансних явищ, що сприяло підвищенню якості обробки поверхонь на мікро- і нанорівні. Отримана в результаті фрезерування якісна поверхня з мінімальною шорсткістю та мікродфектами є оптимальною основою для подальшої її функціоналізації.

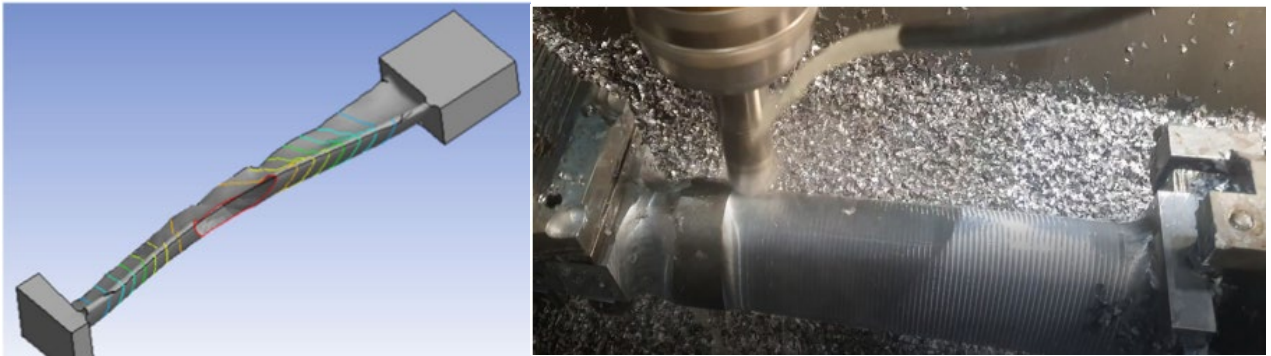


Рисунок 21 – Стратегія обробки локальних критичних зон профілю лопатки із застосуванням ізоляцій рівних деформацій та власних частот

Для функціоналізації поверхні застосовувалося нано- та фемтосекундне лазерне текстурування (установки Minimarker-2 та Jasper X0-20). Досліджувався вплив енергії імпульсу, частоти повторення імпульсів, швидкості сканування лазерним променем та кількості проходів на формування як випадкової, так і періодичної мікроструктури модифікованої поверхні (рис. 22).

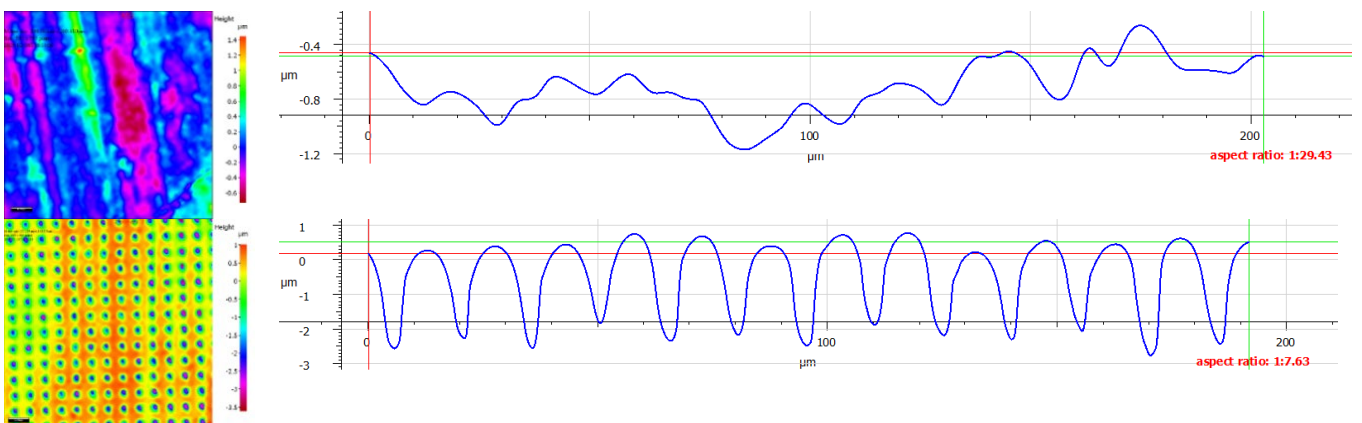


Рисунок 22 – Візуалізація та перерізи поверхні зроблені за допомогою оптичного профілометра: а – після фрезерування; б – після лазерного текстурування

Дослідження показали, що лазерне текстурування дозволило цілеспрямовано на мікро- і нанорівні створювати на поверхні сталі та титану періодичні структури (LIPSS, мікролунки), надаючи їй нових функціональних властивостей (рис. 23).

Встановлено, що синергія лазерної текстури (діаметр/глибина 5 мкм) з твердими мастильними добавками (графіт, hBN) призводить до кардинального покращення трибологічних властивостей (рис. 24), що є актуальним для трибологічно навантажених вузлів, наприклад шийок кривошипних валів. Такий синергетичний ефект дозволив знизити коефіцієнт тертя до 75% та знос до 51% порівняно з нефункціоналізованою поверхнею.

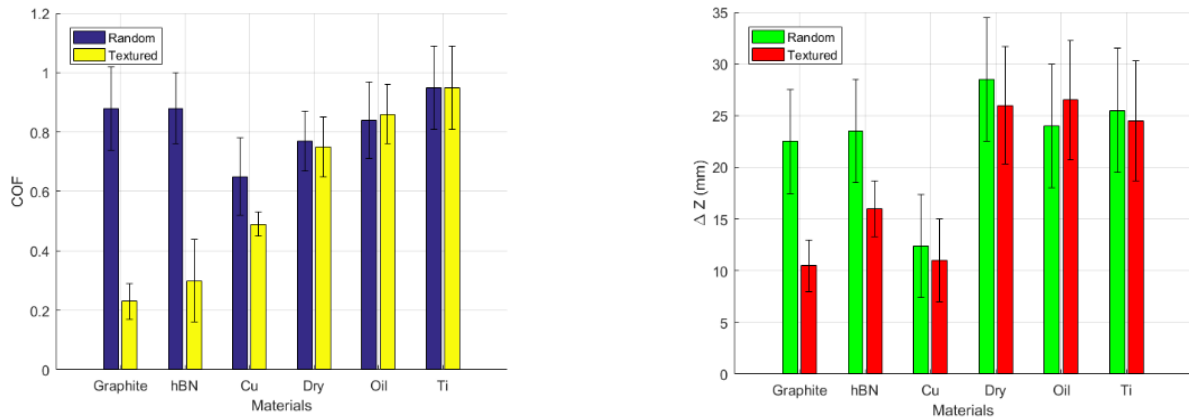


Рисунок 23 – Аналіз трибологічних характеристик поверхонь після фрезерування та лазерного текстурування: а – коефіцієнт тертя і б) ΔZ – коефіцієнт зносу

Було визначено, що здатність системи «лазерна текстура + мастильна добавка» ефективно знижувати коефіцієнт тертя та зношування визначається ефективністю механічного утримання частинок добавки в мікролунках текстури. Встановлено, що наносекундне лазерне текстурування дозволило цілеспрямовано підвищити мікротвердість поверхні на 20-30%, ймовірно за рахунок термічного зміцнення. Для деталей, що працюють в умовах обledenіння (наприклад, лопатки компресорів), лазерне текстурування дозволило створити стійкі супергідрофобні поверхні з антикриговими властивостями.

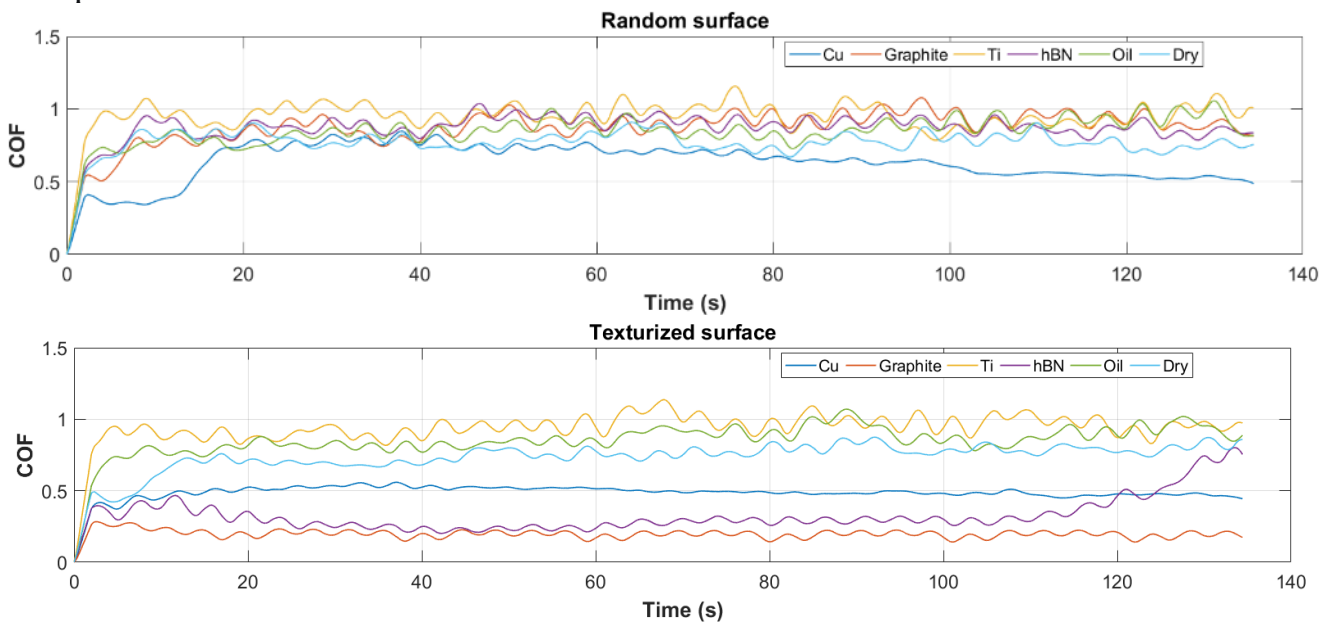


Рисунок 24 – Порівняння зміни коефіцієнта тертя в часі для випадкових та лазерно-структурованих поверхонь

Гідрофобність та гідрофільність модифікованої лазерним променем поверхні досліджувалися методом еволюції контактного кута протягом 45 діб після лазерного оброблення («старіння» поверхні). Проводились натурні випробування на танення льоду та снігу, випаровування води при низьких температурах. Експериментально доведено, що інтенсивна лазерна обробка формує модифіковану поверхню, яка після періоду «старіння» (20-27 діб) набуває стійких супергідрофобних та протиобледенінних властивостей, де час танення льоду скорочується на 50-60 с, а швидкість руху крапель води зростає в 4-5 разів порівняно з необробленою поверхнею.

В результаті чисельних експериментів встановлено, що функціональність

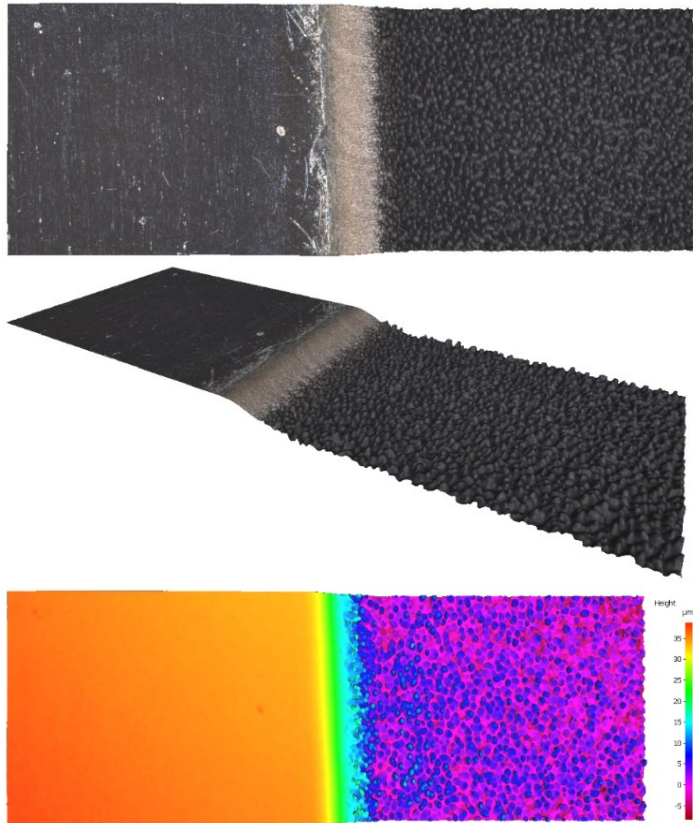


Рисунок 25 – Аналіз межі між обробленою та необробленою фемтосекундним лазерним опроміненням поверхнею зразка за допомогою цифрового оптичного мікроскопа Alicona Infinite-Focus G5: а – зображення згори; б – тривимірна реконструкція поверхні зразка; в – карта розподілу висот (картографія шорсткості)

модифікованої поверхневої текстури залежить від відповідності її геометричних параметрів (глибини западин, діаметра кратерів, відстані між лунками, наявності вторинних 3D-структур тощо) розміру частинок добавок (наприклад, графіту, hBN) або механізму утримання повітряного прошарку (поверхня за моделлю Кассі-Бакстера), що підкреслює важливість прецизійного контролю за топологією оброблених поверхонь на мікро- та нанорівні.

Окремий напрям дослідження було присвячено технологічним особливостям створення QR-зображень на металевих поверхнях фемтосекундним лазерним текстуруванням, що розглядали як елемент наскрізної цифровізації технологічних ланцюгів постачання машинобудівних виробів. Проведений аналіз однозначно довів прямий зв'язок між 3D-оптичною інформацією та якістю 3D-структур на мікрорівні. Обґрунтовано, що оптичні властивості маркування визначаються специфічним мікрорельєфом, сформованим

фемтосекундним лазером (рис. 25). Встановлено, що ключовим фактором є значне збільшення площі поверхні ($S_{dr} > 56\%$), що забезпечує ефект багатократного розсіювання та поглинання світла. У поєднанні з помірною висотою мікронерівностей (S_a , S_z), яка є достатньою для формування контрастного поля елементів QR-коду без руйнування обробленої і дотичної поверхні, та з крутими градієнтами мікрорельєфу ($S_{dq} > 1$), цей ефект призводить до суттєвого підсилення

оптичної чорноти (рис.26). Утворений мікрорельєф створив ідеальні умови для уловлювання світла. Отримана структура забезпечила його майже повне поглинання, що макроскопічно проявляється як інтенсивна чорнота, що необхідна для стабільного зчитування та відтворення 3D-інформації на макрорівні. Таким чином, контрольоване створення 3D-мікроструктури з певними параметрами шорсткості є науково обґрунтованою умовою для отримання функціонального, стійкого та зчитуваного QR-коду на металевій поверхні маркованих деталей, інтегрованих у цифрові ланцюги постачання та систему технологічної підготовки виробництва МСП.

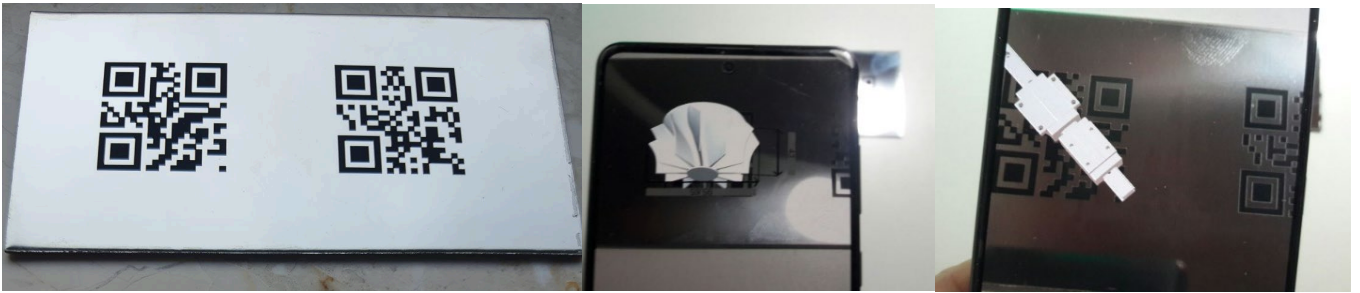


Рисунок 26 – Приклад готового QR-коду та демонстрація його зчитування мобільним пристроєм з ОС Android (додаток Vuforia)

Для кривошипних валів було додатково розроблено дискретно-масову модель на основі даних, отриманих методом скінчених елементів (МСЕ), яка враховувала нелінійні фактори, такі як гідродинамічні сили в мастильному шарі, демпфування та контактні взаємодії. Ця модель дозволила на мікрорівні проаналізувати вплив залишкових розбалансувань та умов змащення на динаміку валу. Відповідно до принципів 3D концепції було запропоновано метод точної ідентифікації технологічних параметрів для забезпечення якісної обробки поверхонь. На прикладі процесу шліфування шийок кривошипних валів було розроблено комбінований метод, що поєднує цифровий експеримент, штучні нейронні мережі та багатопараметричний регресійний аналіз. Такий підхід дозволив на практиці інтегрувати масив експериментальних цифрових і оцифрованих даних з мезорівня (параметри технологічного процесу: швидкості, подача, тощо) для створення високоточної цифрової моделі прогнозування сили різання на мікрорівні. Отримана модель з загальною похибкою менше 5% забезпечила швидку оцінку впливу змін технологічних параметрів на силові характеристики процесу. Це дозволило в режимі, близькому до реального часу, адаптивно керувати циклом шліфування, оптимізуючи його для підвищення продуктивності при дотриманні жорстких вимог до точності та якості обробки відповідальних деталей.

Встановлено, що використання цифрових методів дослідження на мікрорівні дозволило прогнозувати поведінки деталей під навантаженням в процесі фрезерування та шліфування, визначати власні частоти, форми коливань та амплітуди вимушених коливань, а також оцінку впливу технологічних параметрів механічної обробки на динамічну стійкість досліджуваної системи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеним науковим дослідженням, розроблено та обґрунтовано наукові положення, висновки і рекомендації, сукупність яких підсумовує нові науково-обґрунтовані результати в галузі машинобудування, які дозволили вирішити важливу науково-прикладну проблему забезпечення сталості малих та середніх машинобудівних підприємств України в умовах стресу шляхом підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва під час виготовлення відповідальних деталей машин на основі впровадження концепції наскрізної 3D-цифрової підтримки життєвого циклу виробів. Одержані науково-практичні результати полягають у наступному:

1. Сформовано теоретичні засади забезпечення технологічної, виробничої стійкості та сталості малих і середніх підприємств машинобудування на основі цифровізації, в яких ключовим елементом виступає створена 3D-концепція. 3D-концепція системно поєднує процеси отримання, аналізу, синтезу та інтеграції багаторівневої 3D-інформації на нано-, мікро-, мезо-, макро- та глоборівнях. Доведено, що концепція реалізується через вертикальну та горизонтальну 3D-інтеграцію багаторівневої інформації, де цифрові дані представлені не лише у вигляді моделей і симуляцій, а й у формі оцифрованих даних реальних об'єктів. Концепція дозволила скоротити час технологічної підготовки виробництва машинобудівної продукції, підвищити адаптивності виробничо-технологічного середовища МСП до зовнішніх і внутрішніх стресових факторів.

2. Створено підхід до мінімізації часу прийняття та реалізації виробничо-технологічних рішень в умовах малої дискретно-нестабільної серійності виготовлення машинобудівної продукції. Вперше доведено, що саме скорочення часу технологічної підготовки виробництва, є ключовим фактором забезпечення технологічної та виробничої сталості машинобудівних МСП в умовах хвильових коливань ринку, а собівартість виступає фактором обмеження сталості та граничною умовою ринкової життєздатності. Розроблено варіаційно-аналітичну модель сталого розвитку машинобудівних МСП з урахуванням впливу часу, продуктивності, цифрових ресурсів та витрат, що дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів у часі та забезпечити ефективне управління процесами технологічної підготовки виробництва. Вперше введено та оптимізовано інтегральну цільову функцію часу технологічної підготовки виробництва, яка узгоджується з обмеженням на собівартість та враховує множину факторів обмеження продуктивності підприємства (кваліфікація персоналу, доступ до технологій, рівень цифровізації тощо).

3. Розроблено концептуальний та інструментальний підходи до дослідження взаємозв'язку технологічної та виробничої сталості машинобудівних МСП з фазами коливань машинобудівного ринку в умовах глобальних викликів.

Створено інтегральний функціонал гнучкості, який уперше формалізує адаптивність підприємств як багатофакторну функцію часу технологічної підготовки виробництва та критичних параметрів технологічної підготовки виробництва. Час у цій моделі представлено у нормалізованому вигляді. Оптимізацію цього функціоналу здійснено методом автоматичного планування на основі переваг. Це дозволило враховувати пріоритетність кожного з параметрів (якість, продуктивність, управління

запасами, інноваційність, відповідність стандартам, цифровізацію, візуалізацію та 3D-представлення) залежно від фази коливань попиту на ринку та внутрішніх обмежень МСП.

Створено програмний продукт на мові програмування JAVA для оптимізації інтегрального функціоналу гнучкості, в якому використано метод автоматичного планування на основі переваг.

Встановлено, що технологічна та виробнича сталість МСП має фазову природу. Вона проявляється у змінній гнучкості виробничої програми, динаміці часових інтервалів прийняття рішень та здатності до адаптивного управління ресурсами.

Показано, що комплексне застосування 3D-технологій в умовах стресових викликів та дискретно-нестабільної серійності діє у протифазі до зниження продуктивності виробництва, ефективності управління ресурсами, а також якості виготовлення продукції. У таких умовах 3D-технології відіграють роль адаптивного механізму до зовнішніх глобальних викликів. Вони дозволяють компенсувати втрати сталості технологічної підготовки виробництва та підтримувати необхідну якість продукції завдяки швидкому внесенню змін у виробничі процеси. У центрі цієї адаптації – інженерні рішення на базі цифровізації та 3D-інформації.

4. Запропоновано методологічний та програмно-інструментальний підходи до створення єдиного цифрового простору для наскрізної 3D-цифровізації життєвого циклу продукції на основі об'єднаної цифрової платформи з відкритою архітектурою на Java. Встановлено, що центральною проблемою реалізації концепції Індустрії 4.0 для малого машинобудівного підприємства України є цифровізація та інтеграція всіх етапів технологічної підготовки виробництва та виготовлення продукції у єдиному просторі (CAD/CAM/CAE/CAPP/ERP). Обґрунтовано доцільність та ефективність поетапного впровадження модульних цифрових рішень (додатків), створених невеликими міждисциплінарними командами на базі платформи Java MachCluster, що в свою чергу реалізують принципи наскрізної інтеграції знань, освіти та виробництва. Розроблено прототип платформи, що підтримує вертикальну та горизонтальну інтеграцію 3D-інформації на нано-, мікро-, мезо-, макро- та глоборівнях. Показано, що реалізація такої інтеграції через цифрову модульну ERP-систему з відкритим ядром і модульними компонентами сприяє скороченню часу на виконання критичних виробничих і логістичних операцій, підвищує точність планування, адаптивність до стресових умов, та забезпечує сталу технологічну підготовку виробництва в умовах критично малої дискретно-нестабільної серійності.

5. Уперше сформовано методологію інтеграції QR-коду з цифровою 3D-інформацією для зменшення часу міжопераційного простоювання об'єкта виробництва в цехах підприємства. Суть методології полягає у використанні QR-коду як інтерактивного носія, що містить посилання на хмарні 3D-моделі з рівнями деталізації (LoD) та супутні технологічні дані, які візуалізуються на мобільному пристрої в реальному часі (через платформу UNITY + Vuforia). Зчитані дані слугують основою для прийняття рішень, як на етапі підготовки виробництва так і в реальному масштабі часу в процесі виробництва.

6. Розроблено новий ланцюг технологічної підготовки виробництва машинобудівної продукції для малих і середніх підприємств, орієнтований на

виробничу сталість МСП у режимі критично малої дискретно-нестабільної серійності. У ньому створено принципово нову послідовність цифрової координації інженерних рішень, в якій рівень 3D CAE-аналіз виступає керуючою ланкою в технологічній підготовці виробництва машинобудівної продукції. Ланцюг реалізовано на засадах 3D концепції через багаторівневу інтеграцію цифрових двійників, 3D-інформації та оцифрованої фізичної інформації.

На прикладі технологічної підготовки виробництва турбокомпресорів автомобіля, що можуть працювати частково або повністю на водневому паливі, доведено переваги впровадження 3D-концепції шляхом створення цифрової 3D-моделі виробу і газодинамічних процесів із інтегрованими геометричними та фізичними параметрами. Це забезпечило цифрове прогнозування геометричних, фізичних та газодинамічних параметрів агрегату та його компонентів, що дозволяє скоротити час на технологічну підготовку виробництва в умовах невизначеності.

Ефективність концепції також підтверджена при цифровому моделюванні тонкостінних елементів міх-турбіни і роботи агрегату в цілому, де за рахунок варіювання геометрії ротора на мезо- і макрорівнях досягнуто підвищення ізоентропійного ККД на 2,15–2,34 %, зниження маси ротора до 31,98 %, зменшення масової витрати робочого тіла (до 4,07 %). Встановлено, що при кутах виходу лопаток від -60° до -70° забезпечується максимальна робота на виході, а використання дифузора при кутах понад -52° дозволяє рекуперувати кінетичну енергію потоку. Проведений багаторівневий аналіз підтвердив існування критичних зон високого числа Маха на лопатках, що може впливати на надійність виробу.

7. Підтверджено важливість використання 3D-цифрових моделей на різних рівнях (нано-, мікро-, мезо-, макро- та глобальному) для прийняття інженерних рішень під час технологічної підготовки виробництва компонентів і агрегатів, особливо в умовах дискретно-нестабільної серійності:

- доведено критичну роль комплексного 3D-аналізу 3D-характеристик поверхні металів на мікро- і нанорівні у скороченні часу на прийняття рішень щодо підвищенні якості поверхонь на етапах технологічної підготовки виробництва машинобудівних компонентів та агрегатів. Використання мікроскопії (електронної, атомно-силової та оптичної) у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволило виконати прецизійну діагностику стану поверхні, прогнозування зносу та корекцію параметрів обробки;

- створення дискретно-масової моделі для аналізу коливань тонкостінних деталей підтвердило її ефективність для аналізу вібрацій і спадковості частот коливань. Дослідження показали, що зміна жорсткості закріплення під час механічної обробки впливає на частоти в діапазоні 120-500 Гц, що критично важливо для запобігання резонансам та оптимізації процесів виготовлення деталей;

- застосування цифрових двійників для контролю та коригування параметрів обробки дозволило не тільки знижувати рівень вібрацій на 18%, а й підвищити точність прогнозування динамічних характеристик на 22%. Це було підтверджено на прикладі колінчастих валів та лопаток, де варіація жорсткості закріплення безпосередньо впливає на амплітуди коливань і ефективність обробки;

- використання 3D-інформації і чисельного аналізу дозволило розширити застосування концепції цифрових двійників для контролю спадковості частот

коливань на різних етапах виготовлення тонкостінних елементів зі змінною жорсткістю та консольним закріпленням. Це дало змогу знизити вібраційні навантаження на 10-15% завдяки оптимізації стратегії переміщення фрези, що заснована на локалізації небезпечних зон оброблення та адаптації технологічних параметрів різання до цих зон. Замість традиційної стратегії з постійними параметрами різання по всій поверхні, запропоновано виявляти, за допомогою МСЕ-моделювання, небезпечні зони (за ізолініями рівних деформацій та власних частот) і програмно змінювати (адаптувати) в них технологічні параметри (наприклад, подачу), щоб уникнути резонансних явищ і забезпечити рівномірну якість поверхні;

- лезерним текстуруванням металевих поверхонь досягнуто стабільного формування мікро- та нанорельєфів із контрольованими параметрами. Створено багаторівневу 3D-шорсткість. Доведено, що багатопараметричне представлення 3D-шорсткості (S_a , S_q , S_{sk} , S_{ku} , S_{dr} , V_{mp} , V_{mc} , V_{vv}) є критичним для оптимізації технологічних маршрутів, інтеграції механічної та лазерної обробки, а також підвищення функціональності деталей. Результатом двостадійного (фрезерного та лазерного) оброблення стало стійке формування мікро- і нанорельєфів, що забезпечило підвищення гідрофобних властивостей (кут змочування понад 130°) та зниження коефіцієнта тертя до 30%.

8. Проведена практична апробація запропонованих рішень та 3D-підходів у межах провідних вітчизняних підприємств, що спеціалізуються на виготовленні високотехнологічних машинобудівних компонентів. З позитивними результатами були реалізовані прикладні розробки у виробничих умовах ПрАТ «Турбогаз» та ТОВ «АРТ ТЕК», що підтверджується відповідними актами впровадження. Запропоновані цифрові рішення та створені програмні продукти в межах 3D-концепції та методики 3D-інтеграції забезпечили скорочення термінів ТПВ та підвищення якості кінцевої продукції.

На основі результатів дослідження рекомендовано впровадження інструментів багаторівневої 3D-концепції у ланцюжки створення та модернізації агрегатів машинобудівної галузі, зокрема турбокомпресорів та енергоефективних вузлів, що працюють в умовах змінних навантажень. Розроблена методика інтеграції цифрових даних про об'єкт виробництва на 3D нано-, мікро-, мезо-, макро рівнях у вигляді цифрової інформації і цифрових моделей та у вигляді оцифрованої інформації реальних об'єктів рекомендована до використання на МСП для підвищення адаптивності до фазових змін ринку та скорочення часу прийняття антикризових рішень у ТПВ.

Результати теоретичних та прикладних досліджень впроваджені в навчальний процес кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» при підготовці здобувачів I–III рівнів вищої освіти за спеціальностями галузі знань 13 «Механічна інженерія», згідно з чинними освітньо-професійними та освітньо-науковими програмами. Запропоновані розробки можуть бути використані під час створення програмних комплексів для інтеграції цифрових двійників та кіберфізичних систем у технологічну підготовку виробництва на підприємствах машинобудівного профілю.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ***Статті у наукових фахових виданнях України:***

1. Добротворський С.С., Басова Є.В., Добровольська Л.Г. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2015. № 822. С. 7-13. (кат «Б»).

Здобувачкою досліджено цифрові методи комп'ютерного моделювання високошвидкісного фрезерування загартованих сталей як складової частини мезорівня цифровізації.

2. Yakovenko I., Vasilevskiy Y., Basova Y., Edl M. Technological provision of the accuracy for the thread form of rod pumps. *Cutting & Tools in Technological System*. 2021. Issue 94. P. 126-134. (кат. «Б»).

Здобувачкою здійснено моделювання технологічної точності у контексті цифрового супроводу процесів різання для забезпечення сталості виробничих процесів.

3. Chelabi M.A., Basova Y., Hamidou M.K., Dobrotvorskiy S. Analysis of the Three-Dimensional Accelerating Flow in a Mixed Turbine Rotor. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8(2). P. D1-D7. (кат. «Б»).

Здобувачкою прийнято участь у 3D-аналізі потоку робочого тіла в турбінному роторі методами CFD з метою врахування експлуатаційних умов виробу на етапі технологічної підготовки його виготовлення.

4. Добротворський С. С., Басова Є. В., Харченко О. С., Летюк В. І., Яковенко І. Е., Котляр О. В., Абу Самра Ю. Визначення особливостей форми та частоти коливань лопаток турбіни на цифрових моделях. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні*. 2022. № 2(6). С. 117-123. (кат. «Б»).

Здобувачкою створено цифрові моделі турбінних лопаток для цифрових досліджень їх коливань з метою формування цифрової гнучкості виробництва відповідних деталей.

5. 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. (кат. «Б»).

Здобувачкою запропоновано алгоритм для вибору параметрів кінцевого фрезерування на основі цифрового підходу до обробки тонкостінних елементів.

6. Добротворський С. С., Басова Є. В. Шляхи забезпечення конкурентоспроможності малих та середніх машинобудівних підприємств України в умовах європейської інтеграції. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні*. 2023. № 1(7). С. 45-54. (кат. «Б»).

Здобувачкою виконано аналіз шляхів підвищення конкурентоспроможності МСП через впровадження цифровізації.

7. Яковенко І. Є., Пермяков О. А., Басова Є. В., Котляр О. В., Руденко О. О. Забезпечення точності при обробці об'єктів важкого машинобудування портативними верстатами. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Машинознавство та САПР*. 2023. № 1. С. 160-166. (кат. «Б»).

Здобувачкою обґрунтовано доцільність використанням 3D-інформації для оцінки точності формоутворення поверхні дедалі при проєктуванні портативних верстатів на основі агрегатно-модульного принципу.

8. Яковенко І. Е., Пермяков О. А., Ільїн Д. О., Басова Є. В., Горбулик В. І. До проблем автоматизації дільниці механічної обробки деталей з полістиролу. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні.* 2024. № 1(9). С. 19-28. (кат. «Б»).

Здобувачкою прийнято участь у розробленні системи автоматизації обробки полістирольних деталей для забезпечення оперативності і стабільності технологічного процесу їх виготовлення.

9. Добротворський С. С., Басова Є. В., Алексенко Б. О., Приходько В. О., Добровольська Л. Г., Басов В. В. Вплив короткоімпульсного лазерного випромінювання на формування поверхневих мікроструктур та твердість нержавіючої сталі. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні.* 2024. № 1(9). С. 51-59. (кат. «Б»).

Здобувачкою виконано дослідження нанорівневої 3D цифрової інформації на прикладі структурованої поверхні з метою аналізу впливу її морфології на формування функціональних властивостей.

10. Яковенко І. Е., Пермяков О. А., Линник О. І., Басова Є. В. Технологічні інновації як засіб забезпечення конкурентної переваги мікро, малих і середніх машинобудівних підприємств. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні.* 2024. № 2(10). С. 74-86. (кат. «Б»).

Здобувачкою реалізовано аналіз використання технологічних інновацій для підвищення гнучкості і конкурентоспроможності малих і середніх машинобудівних підприємств.

11. Бондар Д. В., Басова Є. В., Водка О. О. Автоматизація контролю якості вживаних деталей на основі 2D-зображень і невізуальної інформації: підхід до подовження життєвого циклу виробу. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Динаміка і міцність машин.* 2024. № 2. С. 59-65. (кат. «Б»).

Здобувачкою сформовано та реалізовано багаторівневу 3D-концепцію як цифрового інструменту подовження життєвого циклу виробу.

12. Басова Є.В., Добротворський С.С., Яковенко І.Е. Моделювання зміни у часі виробничої компоненти гнучкості машинобудівних малих і середніх підприємств в умовах різкого коливання попиту і пропозиції ринку. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР.* 2024. № 2. С. 6-13. (кат. «Б»).

Здобувачкою розроблено та проаналізовано математичну модель забезпечення сталості машинобудівних МСП України, що описала стабільність машинобудівного підприємства в умовах зовнішніх стресових факторів типу різких коливань попиту та пропозиції на ринку.

13. Добротворський С. С., Басова Є. В., Алексенко Б. О., Трубін Д. В., Завадзький П., Кошцінський М. Дослідження технологічної спадковості шорсткості поверхні титану під час двостадійного оброблення методами торцевого фрезерування та фемтосекундного лазерного текстуровання. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.* 2024. № 2(57). С. 67-77. (кат. «Б»).

Здобувачкою вперше досліджено вплив технологічної спадковості на гідрофобність титанових поверхонь після фрезерування та фемтосекундного лазерного опромінення на основі мікрорівневої цифрової 3D-інформації.

14. Добротворський С. С., Алексенко Б. О., Басова Є. В. Комп'ютерне моделювання багатоімпульсного лазерного впливу, що забезпечує зберігання первісної мікроструктури. *Вісник Сумського НАУ. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2025. № 1(59). С. 25-31. (кат. «Б»).

Здобувачкою опрацьовано вплив багатоімпульсної фемтосекундної лазерної обробки на збереження мікрорельєфу поверхні сталі AISI 321 з позицій мікрорівневої цифрової 3D-інформації.

15. Басова Є.В., Добротворський С.С., Яковенко І.Е. Моделювання часової динаміки інформаційної компоненти гнучкості машинобудівних МСП в умовах хвильових коливань ринку. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР*. 2025. № 1. С. 3-10. (кат. «Б»).

Здобувачкою опрацьовано стратегічну роль багаторівневої 3D-інформації в межах концепції Industry 4.0 як основи цифрової трансформації, що забезпечує адаптивність, гнучкість і стійкість малих і середніх машинобудівних підприємств до зовнішніх викликів. Визначено роль часу у забезпеченні сталості таких підприємств в умовах дискретно-нестабільного виробництва.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

16. Fesenko A., Yevsiukova F., Basova Y., Ivanova M., Ivanov V. Prospects of using hydrodynamic cavitation for enhancement of efficiency of fluid working medium preparation technologies. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 62, No. 4. P. 269-276. (Scopus, WoS, Q2, Угорщина).

Здобувачкою проведено енергетичне моделювання гідродинамічних процесів при кавітаційній обробці робочої рідини, а також запропоновано та описано енергетичну модель розподілу потужності в роторно-пульсаційному апараті.

17. Fesenko A., Basova Y., Ivanov V., Ivanova M., Yevsiukova F., Gasanov M. Increasing of equipment efficiency by intensification of technological processes. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 63. No. 1. P. 67-73. (Scopus, WoS, Q2, Угорщина).

Здобувачка брала участь у формуванні наукового підходу до оцінки ефективності гідродинамічної дії в роторно-кавітуючих пристроях на засадах 3D концепції. Нею було опрацьовано сучасні підходи до інтенсифікації технологічних процесів на основі ефектів кавітації та розроблено методологію оцінки теплового навантаження робочого середовища, що потребувало інтеграції багаторівневої 3D інформації.

18. Kotliar A., Basova Y., Ivanov V., Murzabulatova O., Vasytsova S., Litvynenko M., Zinchenko O. Ensuring the economic efficiency of enterprises by multi-criteria selection of the optimal manufacturing process. *Management and Production Engineering Review*. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 52-61. (Scopus, Q2, Польща).

Здобувачкою зроблено внесок у розвиток теорії та практики технологічної підготовки виробництва складнопрофільних деталей шляхом розроблення та обґрунтування підходу до вибору оптимального варіанта обробки на основі

багатокритеріальної оптимізації, що потребує інтеграції і синтезу багаторівневої 3D інформації.

19. Syzyi Y., Ushakov O., Slipchenko S., Basova Y., Ivanova M. Simulation of the contact temperature in the cylindrical plunge grinding process. *Diagnostyka*. 2020. Vol. 21. No. 2. P. 77–86. (Scopus, Q4, Польща).

Здобувачкою виконано формалізація методики визначення глибини дефектного шару та розрахунку мінімального числа обертів деталі у фазах чорнового і чистового шліфування шляхом синтезу та аналізу різнорівневої цифрової та оцифрованої інформації.

20. Pavlenko I., Saga M., Kuric I., Kotliar A., Basova Y., Trojanowska J., Ivanov V. Parameter identification of cutting forces in crankshaft grinding using artificial neural networks. *Materials*. 2020. Vol. 13. Article 5357. (Scopus, Q2, Швейцарія).

Здобувачка виконана програмна реалізація та впровадження методики віртуального експерименту для визначення сили різання за масивом параметрів на основі цифрової та оцифрованої інформації із використанням штучного інтелекту.

21. Pavlenko I., Kuric I., Basova Y., Saga M., Ivanov V., Kotliar A., Trojanowska J. Parameter identification of a discrete-mass mathematical model of crankshaft oscillations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44. Article 601. (Scopus, Q2, Німеччина)

Здобувачкою прийнято участь у розробленні математичної моделі дискретних мас для опису коливань колінчастого вала, що включала визначення параметрів шліфування на основі 3D-концепції. Було виконано інтеграцію фізичних та оцифрованих властивостей деталі (анізотропія, жорсткість) у єдину модель для точного прогнозування її динамічної поведінки в процесі механічного оброблення.

22. Chelabi M.A., Saga M., Kuric I., Basova Y., Dobrotvorskiy S., Ivanov V., Pavlenko I. The effect of blade angle deviation on mixed inflow turbine performances. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Article 3781. (Scopus, Q2, Швейцарія)

Здобувачкою виконано створення поверхневих 3D моделей елементів турбокомпресора та оптимізація 3D геометричних параметрів лопатки турбіни змішаного потоку. Доведено роль геометричної 3D інформації у підвищенні ефективності роботи агрегату.

23. Chelabi M.A., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Aleksenko B.A., Edl M., Zdebor J., Machado J. Influence of the main geometrical parameters on the design and performance of mixed inflow turbines. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Article 12165. (Scopus, Q2, Швейцарія).

Здобувачкою виконано створення поверхневих 3D моделей елементів турбокомпресора та оптимізація 3D геометричних параметрів лопатки турбіни змішаного потоку. На основі геометричної 3D інформації виконана оптимізація конструкції турбіни змішаного потоку без зміни її габаритів.

24. Yakovenko I., Permyakov A., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Kotliar A., Zinchenko A. Prospects for the development of process equipment in aggregate-modular design for sustainable mechanical engineering. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2023. No. 13. P. 145-156. (Scopus, Q4, Румунія)

Здобувачкою обґрунтовано ефективність впровадження цифрових інструментів, зокрема 3D-візуалізації та 3D-ідентифікаційної інформації, у систему керування життєвим циклом модульного обладнання для машинобудівних МСП.

25. Basova Ye., Dobrotvorskiiy S., Balog M., Iakovets A., Chelabi M. A., Zinchenko A. Increasing SME supply chain resilience in the face of rapidly changing demand with 3D model visualization. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2023. No. 14. P. 35-47. (Scopus, Q4, Румунія)

Здобувачкою виконано аналіз логістичних проблем з якими стикаються машинобудівні МСП України. Запропоновано та реалізовано концептуальне рішення щодо використання 3D-візуалізації та пов'язаної з нею 3D-інформації у керуванні матеріальними та інформаційними потоками в технологічній підготовці машинобудівних МСП на основі QR-кодів.

26. Pavlenko, I., Kononenko, S., Czernek, K., Witczak, S., Dobrotvorskiiy, 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 milling. *Energies*. 2023. Vol. 16. Article 1511. (Scopus, Q1, Швейцарія)

Здобувачкою запропоновано врахування 3D-деформації при побудові моделі коливань лопатки з урахуванням зміни перерізу вздовж довжини.

27. Dobrotvorskiiy S., Aleksenko B.A., Basova Y., Gnilitskyi I.M., Kościński M., Machado J. Light beam scattering from the metal surface with a complex mono- and two-periodic microstructure formed with femtosecond laser radiation. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Article 8662. (Scopus, Q2, Швейцарія)

Здобувачкою запропоновано підхід до аналізу утворення мікроструктур з урахуванням багаторівневої 3D-інформації при моделюванні лазерної обробки.

28. Dobrotvorskiiy S., Gnilitskyi I.M., Aleksenko B.A., Basova Y., Zawadzki P., Kościński M. Influence of stainless steel surface roughness parameters on the degree of its blackening during femtosecond laser processing. *Results in Surfaces and Interfaces*. 2025. Vol. 18. Article 100390. (Scopus, Q2, Нідерланди)

Здобувачкою розроблено підхід до просторово-енергетичної візуалізації мікроструктур на основі 3D-аналізу поверхонь та їхньої кольорової ідентифікації.

29. Bondar D., Basova Y., Vodka O. Synthetic-to-real domain adaptation in computer vision systems: towards high-precision industrial applications. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2025. Issue 21. Vol. 1. P. 315-322. (Scopus, Q4, Румунія)

Здобувачкою розроблено методологічні засади інтеграції синтетичних наборів даних, створених на основі 3D CAD-моделей, для підвищення точності промислових вимірювань у системах комп'ютерного технічного зору, що безпосередньо сприяє розвитку наукових основ цифровізації технологічної підготовки виробництва машинобудівних компонентів.

Монографії та розділи в колективних монографіях:

30. Dobrotvorskiiy S., Dobrovolska L., Basova Y., Sokol E., Edl M. The Role of “JavaMach Cluster” in Training for Industry 4.0. *Industry 4.0 – Shaping the Future of the Digital World*. ed. by S. Sihn, A. Smith. Boca Raton : CRC Press. 2020. P. 75-78.

Здобувачкою запропоновано та обґрунтовано необхідність роботи на єдиній цифровій платформі, що об'єднує науку, навчання та виробництво для забезпечення ефективної технологічної підготовки виробництва інноваційного продукту.

31. Добротворський С.С., Хавін Г.Л., Басова Є.В., Алексенко Б.О., Приходько В.О Шорсткість поверхні при лазерній обробці нержавіючої сталі [Електронний ресурс] : монографія. Харків : НТУ «ХП», 2024. 167 с.

Здобувачкою виконано експериментальні дослідження шорсткості з урахуванням багаторівневої 3D-концепції, що дозволило оцінити формування просторових структур після лазерної обробки сталі AISI 321.

Статті у наукових виданнях, які додатково відображають результати дисертації:

32. Permyakov A., Dobrotvorskiy S., Dobrovolska L., Basova Y., Ivanova M. Computer Modeling Application for Predicting of the Passing of the High-Speed Milling Machining Hardened Steel. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2019. P. 135-145. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою розроблено комп'ютерну модель високошвидкісного фрезерування як частину концепції наскрізної 3D цифрової підтримки життєвого циклу машинобудівної продукції, встановлено закономірності взаємозв'язку параметрів стружкоутворення, кута нахилу канавки фрези та енергетичних характеристик процесу для оптимізації технологічної підготовки виробництва відповідальних деталей в умовах малої дискретно-нестабільної серійності.

33. Kotliar A., Basova Y., Ivanova M., Gasanov M., Sazhniev I. Technological Assurance of Machining Accuracy of Crankshaft. *Advances in Manufacturing II. MANUFACTURING 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2019. P. 37-51. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою проведено аналіз технологічних процесів виготовлення колінчастих валів, виконано розрахунок елементів підпора та моделювання впливу сил різання на точність обробки в межах реалізації концепції наскрізної 3D-цифрової підтримки технологічної підготовки виробництва.

34. Dobrotvorskiy S., Basova Y., Dobrovolska L., Sokol Y., Kazantsev N. Big Challenges of Small Manufacturing Enterprises in Industry 4.0. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2020. P. 118-127. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачем проведено аналіз інформаційних рішень для цифровізації малих машинобудівних підприємств, обґрунтовано застосування модульної ERP-системи та оцінено ефективність інтегрованого інтерфейсу для уніфікації інформаційних потоків в технологічній підготовці виробництва.

35. Dobrotvorskiy S., Balog M., Basova Y., Dobrovolska L., Zinchenko A. Concept of the Software for Materials Selection Using .NET Technologies. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2020. P. 32-43. DOI: 10.1007/978-3-030-40724-7_4. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою проаналізовано шляхи інтенсифікації технологічних процесів обробки загартованих сталей, обґрунтовано використання відкритих баз даних та

.NET-технологій для уніфікації інформаційних потоків з метою забезпечення сталості технологічної підготовки виробництва в умовах Industry 4.0.

36. Dobrotvorskiy S., Kononenko S., Basova Y., Dobrovolska L., Edl M. Development of Optimum Thin-Walled Parts Milling Parameters Calculation Technique. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2021. P. 343–352. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою розроблено підхід до інтелектуального вибору параметрів фрезерування тонкостінних деталей на основі цифровізації виробництва та баз даних розрахунків, що забезпечує сталу технологічну підготовку виробництва в умовах Industry 4.0.

37. Dobrotvorskiy S., Basova Y., Kononenko S., Dobrovolska L., Mounif A. S. Y. A Special Feature of Turbine Blade Deformation During Machining. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2022. P. 220-231. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою досліджено вплив умов фіксації лопатки турбіни під час чистової обробки на власні частоти коливань, виконано порівняння аналітичних і цифрових моделей та проведено чисельне моделювання з використанням 3D-інформації з мезорівня.

38. Dobrotvorskiy S., Basova Y., Yepifanov V., Letiuk V., Dobrovolska L., Shelkovyi O. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 534. Springer, Cham, 2023. P. 57-69. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою досліджено закономірності зміни власних частот коливань турбінної лопатки протягом усього технологічного циклу від проектування до встановлення в диску турбіни, виконано цифрове моделювання та визначення розподілу напружень і деформацій з використанням 3D-інформації з мезо- та макрорівнів, розроблено нову стратегію фрезерування поверхні лопаток.

39. Dobrotvorskiy S., Basova Y., Dobrovolska L., Popov V., Mounif A. S. Y. Creation of a Superhydrophilic Surface with Anti-icing Properties for X18H10T Stainless Steel Using a Nanosecond Laser. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 534. Springer, Cham, 2023. P. 172-184. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою проведено дослідження лазерного текстурування металевих поверхонь з формуванням мікро-/наноструктур, сформульовано моделі впливу параметрів обробки на гідрофобність та гідрофільність текстурованої поверхні, а також оцінено її антиайсінг-властивості.

40. Dobrotvorskiy S., Balog M., Ruzmetov A., Basova Y., Hrdzelidze S., Dobrovolska L. Increasing the Sustainability of Manufacturing Processes in the Conditions of SMEs Enterprises by Predicting Their Information Intensity. *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. Innovations in Communication and Computing*. Springer, Cham, 2023. P. 207-219. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою проаналізовано вплив інформаційного навантаження на точність виконання операцій за участю людини в технологічній підготовці виробництва малих і середніх машинобудівних підприємств в умовах автоматизації.

41. Amine C. M., Basova Y., Dobrotvorskiy S., Trubin D., Kharchenko O. The Camberline Optimization Procedure for Mixed Inflow Turbine Rotor. *Advanced Manufacturing Processes VI. InterPartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2025. P. 757-768. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою виконано аналіз літератури та оптимізацію профілів турбінних лопаток змішаного вхідного потоку з використанням цифрових методів моделювання.

42. Bondar D., Basova Y., Vodka O. Analysis of the Efficiency of Quality Control Algorithms for Modified Surfaces for High-Error Processes Based on 2D Miniatures and Non-visual Information. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 1129. Springer, Cham, 2024. P. 35-50. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачка обґрунтувала методику контролю якості машинобудівних виробів на основі цифрової та оцифрованої інформації з використанням алгоритмів машинного навчання та брала участь у її розробленні.

43. Zawadzki P., Dobrotvorskiy S., Aleksenko B., Basova Y., Trubin D., Prykhodko V., Ko'sci'nski M. Features of Modification of the Roughness and Hardness of the Surface of AISI 321 Stainless Steel with Short-Pulse Laser Radiation. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 1129. Springer, Cham, 2024. P. 51-60. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою прийнято участь у експериментальних дослідженнях, обґрунтовано вплив короткоімпульсного лазерного впливу на модифікації металевих поверхонь, досліджено вплив параметрів лазерного імпульсу та стратегії обробки на шорсткість і твердість поверхні нержавіючої сталі AISI 321.

44. Amine C. M., Basova Y., Dobrotvorskiy S., Avdieieva O., Lopes H. The Inlet Average Absolute Flow Angle Effect on Mixed Inflow Turbine Rotor Performances. *Innovations in Mechanical Engineering III. ICIENG 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2024. P. 22-33. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою виконано оптимізації 3D-геометрії лопаток турбіни змішаного потоку з використанням цифрових методів моделювання.

45. Basova Y., Dobrotvorskiy S., Yakovenko I. Investigation of the impact of force majeure circumstances as a market instability factor on the flexibility and sustainability of engineering SMEs. *EAI Endorsed Transactions on Digital Transformation of Industrial Processes*. 2025. Vol. 1. No. 1.

Здобувачкою виконано огляд літератури, сформульовано гіпотезу дослідження, проведено експериментальні дослідження та сформульовано висновки.

46. Dobrotvorskiy S., Talar R., Basova Y., Trubin D., Zawadzki P. Optimization of Milling Parameters to Minimise Surface Roughness for Laser Processing Based on Digital Technologies and 3D Analysis. *Innovations in Mechatronics Engineering IV. ICIE 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2025. P. 182-192. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою виконано огляд літератури, виконано експериментальне дослідження технологічної спадковості при двостадійній обробці металеві поверхні, виконано чисельну оптимізацію параметрів фрезерування удосконаленим методом градієнтного спуску, сформульовано висновки дослідження.

47. Zawadzki P., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Trubin D., Talar R. Coupled Effect of Laser Textured Surfaces and Lubricant Additives in Enhancing Titanium Alloy Tribological Performance. *Innovations in Mechanical Engineering IV. ICIE 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2025. P. 368–379. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою прийнято участь у експериментальних дослідженнях лазерного текстурування поверхні титанового зразка, досліджено вплив параметрів лазерного випромінювання на формування випадкових і періодичних мікро- та наноструктур, встановлено вплив синергетичного поєднання лазерно-модифікованої текстури ямкового типу з твердими мастильними добавками на коефіцієнт тертя на обробленій поверхні.

48. Basova Y., Dobrotvorskiy S., Talar R. The Role of Digitalization and 3D Information in the Technological Preparation of Manufacturing for Engineering Components in SMEs. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2025. ICoRSE 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 1592. Springer, Cham, 2025. P. 229-239. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою обґрунтовано та розвинуто багаторівневу 3D-концепцію, запропоновано новий технологічний ланцюжок виготовлення високотехнологічної машинобудівної продукції, сформульовано висновки дослідження.

49. Yakovenko I., Basova Y., Pokhil A., Sotnychenko V., Freitas L. Modeling the Automation Process of SMEs. *Innovations in Industrial Engineering IV. ICIE 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2025. P. 323-334. (Scopus, Q4, Швейцарія).

Здобувачкою розроблено розширену модель оцінки доцільності автоматизації виробничого процесу, визначено ключові параметри технологічної підготовки виготовлення машинобудівних виробів на прикладі малого підприємства з механічної обробки деталей, сформульовані висновки.

50. 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. *Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 1480. Springer, Cham, 2025. P. 67-78. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачка прийняла участь у дослідженні формування мікроструктур на поверхнях тонкостінних деталей методом накладання сил різання та формулюванні методології і висновків роботи.

51. Kononenko S., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Trubin D., Aleksenko B.A. Impact of Overlapping Method on Cutting Forces and Stresses During End Milling of Thin-Walled Parts. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. DSMIE 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2025. P. 121-132. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачем досліджено формування мікроструктур на поверхнях тонкостінних деталей методом накладання компонентів сили різання при фрезеруванні в рамках концепції наскрізної 3D-цифровізації.

52. Permyakov A., Yakovenko I., Basova Y., Hrdzelidze T., Permiakov Jr. O. Technological Support for Reverse Engineering of Parts Using Additive Methods. *Smart*

Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1480. Springer, Cham, 2025. P. 274-282. (Scopus, Q4, Швейцарія)

Здобувачкою систематизовано сучасні підходи до реверс-інжинірингу деталей у машинобудуванні, розроблено методику технологічної підготовки виробництва на основі інтеграції 3D-моделей та прийнято участь у практичній реалізації відтворення деталей методом 3D-друку з використанням структурних термопластів.

53. Yakovenko, I., Basova, Y., Permyakov, A., Pokhil, A., Sotnychenko, V., & Freitas, L. A Structured Methodology for Synthesizing Parameters and Architecture of Robotic Technological Systems in the Digital Transformation of SME Engineering Production. *EAI Endorsed Transactions on Digital Transformation of Industrial Processes*, 2025. Vol. 1. No 2.

Здобувачкою прийнято участь у розробленні методології синтезу параметрів та архітектури роботизованих технологічних систем для малих і середніх машинобудівних підприємств; також прийнято участь в окремих етапах практичної реалізації автоматизованого виробничого процесу з використанням цифрового контролю та адаптивних технологічних пристроїв.

Об'єкти інтелектуальної власності:

54. Пристрій для випробування матеріалів на гідро-/газообразивний знос : пат. 129166 Україна : G01N 3/56 / Л. М. Заміховський, М. Й. Бурда, Л. Я. Роп'як, О. Л. Заміховська, Є. В. Басова, В. Ю. Малінін. – № а202202544 ; заявл. 15.07.2022 ; опубл. 29.01.2025, Бюл. № 5/2025.

Здобувачкою виконано цифрове моделювання процесів гідро-/газообразивного зношування та розроблено 3D-модель вузла кріплення зразків для забезпечення беззазорного з'єднання і достовірності результатів трибологічних випробувань.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

55. Добротворський С.С., Добровольська Л.Г., Басова Є.В., Гончаров М.В., Устінов І.І. Імітаційне 3D моделювання в технологічній підготовці машинобудівного виробництва. *Сучасні проблеми виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті* : матеріали 15-го Міжнар. наук.-техн. семінару (Свалява, 23-27 лютого 2015 р.). Київ : АТМ України, 2015. С. 59-61.

Здобувачкою визначена та обґрунтована роль імітаційного 3D моделювання в технологічній підготовці машинобудівного виробництва.

56. Добротворський С.С., Басова Є.В., Головатий Р.В. До питання забезпечення якості обробки тонкостінних деталей. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем* : матеріали 6-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 26-29 квітня 2016 р.). Чернігів : ЧНТУ, 2016. С. 37-38.

Здобувачкою на практиці застосовано 3D-цифрові моделі та методи САД/САЕ/САМ для прогнозування деформацій і оптимізації режимів обробки тонкостінних деталей, що забезпечило мінімізацію похибок оброблення та сталість технологічної підготовки виробництва.

57. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кононенко С. М. До питання вдосконалення технології фрезерування деталей із перемінною жорсткістю. *MicroCAD-2017* : тези доп. 25-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 17-19 травня 2017р.). Харків : НТУ «ХП», 2017. С. 107.

Здобувачкою виконані цифрові експерименти фрезерування деталей із перемінною жорсткістю та обробка набору отриманих даних.

58. Горячев А. В., Набока О. В., Басова Є. В. Перспективи застосування SCADA-систем на підприємствах Харкова. *MicroCAD-2019* : тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 15-17 травня 2019р.). Харків : НТУ «ХП», 2019. Ч. I. С. 93.

Здобувачкою виконано аналіз бар'єрів впровадження цифрових систем підтримки життєвого циклу виробу та їх впливу на ефективність технологічної підготовки виробництва.

59. Волинський І. К., Приходько О. Ю., Басова Є. В. Аналіз можливості застосування мереж Петрі для дослідження виробничого підприємства Харкова. *MicroCAD-2019* : тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 15–17 травня 2019р.). Харків : НТУ «ХП», 2019. Ч. I. С. 18.

Здобувачкою обґрунтована та апробована методика цифрової підтримки технологічної підготовки виробництва машинобудівних виробів.

60. Зінченко А. Ю., Добротворський С. С., Басова Є. В. Перспективи застосування .Net-технологій для реалізації інформаційного та програмного забезпечення механообробки сталей. *MicroCAD-2019* : тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 15–17 травня 2019р.). Харків : НТУ «ХП», 2019. Ч. I. С. 107.

Здобувачкою обґрунтовано використання відкритих баз даних та .NET-технологій для технологічної підготовки виробництва машинобудівної продукції.

61. Саленко Д. Д., Балог М., Добротворський С.С., Басова Є.В., Добровольська Л.Г. Автоматизація обліку та контролю асортименту продуктів на складі машинобудівного підприємства. *MicroCAD-2019* : тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 15-17 травня 2019р.). Харків : НТУ «ХП», 2019. Ч. I. С. 147.

Здобувачкою запропоноване та прийнято участь у розробленні цифрового модульного рішення для автоматизації обліку та контролю асортименту продуктів на складі машинобудівного підприємства.

62. Котляр О.В., Гасанов М.І., Басова Є.В., Іванова М.С., Сажнев І.І. Технологічне забезпечення точності обробки колінчастого валу. *MicroCAD-2019* : тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 15-17 травня 2019р.). Харків : НТУ «ХП», 2019. Ч. I. С. 118.

Здобувачкою побудовано цифровий двійник досліджуваного об'єкту і системи.

63. Добротворський С. С., Басова Є. В., Зінченко А. Ю. Реалізація інформаційної та програмної підтримки високоенергетичної обробки сталей з використанням блокчейн технологій. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків - Краматорськ, 27-29 листоп. 2019 р.). Харків : Тарасенко В. П., 2019. С. 27.

Здобувачкою запропоноване та прийнято участь у розробленні цифрового модульного рішення для цифровізації технологічної підготовки виробництва.

64. Добротворський С. С., Басова Є. В., Рузметов А. Р., Євсюкова Ф. М., Пермяков Є.О. До питання розробки інтерфейсу управління підрозділами машинобудівного підприємства. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків - Краматорськ, 27-29 листоп. 2019 р.). Харків : Тарасенко В. П., 2019. С. 30.

Здобувачкою запропонувала розроблення концепції інтерфейсу управління підрозділами машинобудівного підприємства та прийняла участь у її реалізації.

65. Добротворський С.С., Добровольська Л.Г., Басова Є.В., Трубін Д.В., Едл М. Інформаційне та програмне забезпечення для отримання технологічних параметрів процесу високошвидкісного фрезерування деталей змінної жорсткості з використанням WEB технологій для JAVAMACH CLUSTER. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків - Краматорськ, 27-29 листоп. 2019 р.). Харків : Тарасенко В. П., 2019. С. 29.

Здобувачкою запропоноване та прийнято участь у розробленні цифрового модульного рішення для цифровізації технологічної підготовки виробництва на базі відкритої платформи.

66. Добротворський С.С., Добровольська Л.Г., Басова Є.В., Кравченко Є.С., Балог М. Інформаційне та програмне забезпечення циклу технологічної підготовки виробництва CAD/CAM/CAE/CAPP на малому підприємстві з використанням відкритих інформаційних технологій. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків - Краматорськ, 27-29 листоп. 2019 р.). Харків : Тарасенко В. П., 2019. С. 28.

Здобувачкою запропоноване та прийнято участь у розробленні цифрового модульного рішення для цифровізації технологічної підготовки виробництва машинобудівного МСП.

67. Пермяков Є.О, Добротворський С.С., Басова Є.В., Рузметов А.Р., Євсюкова Ф.М. Створення інтерфейсу системи обліку і управління складськими підрозділами машинобудівного підприємства. *XIII Міжнар. наук.-практична конф. магістрантів та аспірантів* : матеріали конф. (Харків, 19-22 листопада 2019 р.). Харків : НТУ «ХП», 2019. С. 115-116.

Здобувачкою запропоновано розроблення концепції інтерфейсу та прийнято участь у його розробленні, узагальнено висновки дослідження.

68. Павлов Д.М., Лупанова Я.В., Басова Є.В., Воропай О.В., Котляр О.В. Автоматизація вибору оптимального діаметра кінцевої фрези для забезпечення шуканої шорсткості поверхні. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 14-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів. (Харків, 1-4 грудня 2020 р.). Харків : НТУ «ХП», 2020. С. 496–497.

Здобувачкою запропоновано та реалізовано програмне рішення для автоматизації вибору діаметра кінцевої фрези з метою скорочення часу технологічної підготовки виробництва машинобудівної продукції.

69. Кузьменко А. Г., Басова Є. В. Забезпечення процесу виготовлення конічних зубчастих коліс із урахуванням сучасних виробничих тенденцій. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 14-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів. (Харків, 1-4 грудня 2020 р.). Харків : НТУ «ХП», 2020. С. 489-490.

Здобувачкою проведений аналіз літератури та узагальнені висновки дослідження.

70. 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). *MicroCAD-2020* : тези доп. 28-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 28-30 жовтня 2020 р.). Харків : Планета-Прінт, 2020. С. 114.

Здобувачкою проведено верифікацію та апробацію розробленого програмного забезпечення на прикладі реальних деталей машинобудування.

71. Котляр О. В., Басова Є. В., Ушаков О. А. Напрямки забезпечення ефективності технологічних систем механічної обробки деталей. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма 7-ї Всеукр. наук.-техн. конф. (Суми, 21-24 квітня 2020 р.). Суми : СумДУ, 2020. С. 47.

Здобувачкою проаналізовано фактори, що впливають на ефективність технологічних систем механічної обробки, та узагальнено напрямки підвищення їх стійкості в умовах дискретно-нестабільної серійності.

72. Добротворський С. С., Басова Є. В., Зінченко А. Ю. Шляхи вирішення задачі синхронізації даних між малими машинобудівними підприємствами в межах вирішення завдань Industry 4.0. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези 7-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків - Краматорськ, 17-19 листопада 2020 р.). Харків : Тарасенко В. П., 2020. С. 18.

Здобувачкою обґрунтовано підхід до синхронізації виробничих даних між малими машинобудівними підприємствами та визначено принципи побудови наскрізного інформаційного середовища для реалізації концепції Industry 4.0.

73. 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* : зб. наук. пр. 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. з проблем вищої освіти і науки (ТК–2020). (Луцьк, 02-04 червня 2020 р.). Луцьк : ЛНТУ, 2020. С. 135-136.

Здобувачкою виконано аналіз дотичних досліджень, прийнято участь у обґрунтуванні технологічних принципів обробки деталей зі змінною жорсткістю з урахуванням впливу гідродинамічного обтікання на процес різання.

74. Zinchenko A., Dobrotvorskiy S., Basova Y., Dobrovolska L., Edl M., Kazantsev N. Creation of specialized software for synchronizing data changes between small manufacturing enterprises. *MicroCAD-2020* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 27–29 травня 2020 р.). Харків : НТУ «ХПІ», 2020. Ч. I. С. 118.

Здобувачкою розроблено концептуальну частину рішення щодо організації синхронізації виробничих даних між малими машинобудівними підприємствами. Визначено архітектурні принципи побудови інформаційного середовища, що забезпечують наскрізну цифрову взаємодію в межах концепції Industry 4.0.

75. Кононенко С.М., Басова Є.В., Добротворський С.С., Горячев А.В. Технологічні показники високошвидкісного фрезерування деталей малої жорсткості в залежності від обраної стратегії. *MicroCAD-2021* : тези доп. 29-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 18-20 травня 2021 р.). Харків: Планета-Прінт, 2021. С. 100.

Здобувачкою проведено аналіз впливу стратегій високошвидкісного фрезерування на параметри якості обробки деталей малої жорсткості, прийнято участь у розробленні підходу до оцінювання технологічних показників процесу фрезерування із урахуванням жорсткісних характеристик заготовки, внесено пропозиції щодо вибору раціональних стратегій обробки для забезпечення якісних характеристик виробів.

76. Котляр О.В., Басова Є.В., Баранов В.М. Багатокритеріальна оптимізація технологічних процесів механічного оброблення фланців. *MicroCAD-2022* : тези доп. 30-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 19-21 жовтня 2022 р.). Харків: НТУ «ХП», 2022. С. 123.

Здобувачкою визначено алгоритмічну послідовність прийняття технологічних рішень, спрямовану на скорочення часу технологічної підготовки виробництва та виготовлення машинобудівної продукції при забезпеченні необхідних показників якості.

77. Орлов Д.О., Белоус Л.А., Добротворський С.С., Басова Є.В., Добровольська Л.Г. Застосування комп'ютерного моделювання для вдосконалення цифрових моделей Mixed Flow-турбін. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 16-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів. (Харків, 14-16 грудня 2022 р.). Харків: НТУ «ХП», 2022. С. 399.

Здобувачкою виконано оптимізацію профілів турбінних лопаток змішаного потоку з використанням цифрових методів моделювання та 3D-аналізу, а також забезпечено інтеграцію отриманих 3D-даних у цифрову модель турбіни.

78. Зінченко А.В., Добротворський С.С., Басова Є.В. Цифрові 3D моделі у інформаційно-логістичному забезпеченні машинобудівного виробництва. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 16-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів. (Харків, 14-16 грудня 2022 р.). Харків: НТУ «ХП», 2022. С. 413.

Здобувачкою розроблено та реалізовано підхід до використання цифрових 3D-моделей для підтримки інформаційно-логістичних процесів у машинобудівному виробництві, що забезпечило наскрізну цифровізацію етапів технологічної підготовки.

79. Харченко О.С., Добротворський С.С., Басова Є.В. Особливості проектування, виготовлення та аналізу параметрів лопатки парової турбіни з бандажною полкою. *Проблеми вищої освіти і науки ТК-2022 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів»* : зб. наук. пр. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (Луцьк, 28-30 травня 2022 р.). Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 211-212.

Здобувачкою здійснено аналітичне та числове моделювання параметрів лопатки парової турбіни з урахуванням конструктивних особливостей бандажної полки, а також виконано цифрову верифікацію геометрії та жорсткісних характеристик лопатки.

80. 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. *Проблеми вищої освіти і науки ТК-2022 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів»* : зб. наук. пр. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (Луцьк, 28-30 травня 2022 р.). Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 164-165.

Здобувачкою прийнято участь у розробленні алгоритму та реалізації програмного рішення для розрахунку технологічних параметрів процесу високошвидкісного фрезерування деталей змінної жорсткості з використанням методу скінчених елементів та веб-технологій, виконане узагальнення висновків дослідження.

81. 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 РТМЕ-2022* : зб. наук. пр. X Міжнар. наук.-техн. конф. (Івано-Франківськ - Яремче, 1-5 лютого 2022 р.). Івано-Франківськ - Яремче, 2022. С. 80-82.

Здобувачкою забезпечено наукове обґрунтування застосування цифрових сервісів для інтенсифікації процесів виготовлення тонкостінних елементів турбомашин.

82. 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 квітня 2022 р.). Суми: Сумський державний університет, 2022. С. 33.

Здобувачкою виконано технологічний аналіз конструкції робочого колеса турбіни зі змішаним потоком, сформовано пропозиції щодо адаптації технологічного маршруту виготовлення до цифрових принципів технологічної підготовки виробництва.

83. Котляр О.В., Басова Є.В., Іванова М.С., Баранов В.М. Застосування принципів багатокритеріальної оптимізації для формування технологічних процесів виготовлення фланців в умовах SMEs. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку* : матеріали 20-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Краматорськ - Тернопіль, 03 вересня 2022 р.). Краматорськ: ДДМА, 2022. С. 122.

Здобувачкою сформовано алгоритм прийняття технологічних рішень з урахуванням виробничих обмежень та параметрів цифрового середовища.

84. Добротворський С.С., Басова Є.В. Основи забезпечення конкурентоспроможності малих та середніх підприємств України в умовах європейської інтеграції. *Прогресивні технології в машинобудуванні* : зб. наук. пр. XI Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів-Звенів, 31.01-3.02.2023). Львів: ЛНТУ, 2023. С. 33.

Здобувачкою визначено ключові бар'єри та напрями підвищення конкурентоспроможності МСП в умовах Євроінтеграції та малої дискретно-нестабільної серійності виробництва.

85. Бондар Д.В., Басова Є.В., Водка О.О. Цифрова класифікація процесів виготовлення деталей з використанням ансамблевих методів машинного навчання в технологічній підготовці виробництва SMEs. *Нові технології в машинобудуванні* : матеріали 33-ї Всеукр. наук.-техн. конф. (Харків, 4-7 вересня 2023 р.). Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2023. С. 131-132.

Здобувачкою обґрунтовано і прийнято участь у розроблені підходу до цифрової класифікації технологічних процесів у технологічній підготовці виробництва в умовах малої дискретно-нестабільної серійності з використанням ансамблевих методів машинного навчання.

86. Зінченко А.Ю., Басова Є.В., Добротворський С.С. 3D візуалізація та цифровізація на шляху забезпечення сталості ланцюжків постачання машинобудівних SMEs. *Нові технології в машинобудуванні* : матеріали 33-ї Всеукр. наук.-техн. конф. (Харків, 4-7 вересня 2023 р.). Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2023. С. 133.

Здобувачкою розроблено підхід до інтеграції 3D-візуалізації та цифровізації в процеси планування й координації ланцюгів постачання та технологічної підготовки виробництва в умовах малої дискретно-нестабільної серійності.

87. Харченко О.С., Басова Є.В., Добротворський С.С. Вплив лазерної обробки на трибологічні властивості поверхні металу. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 17-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів. (Харків, 28-30 листопада 2023 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 504.

Здобувачкою визначено вплив параметрів лазерної обробки на трибологічні властивості металевих поверхонь.

88. Бондар Д.В., Басова Є.В., Водка О.О. Порівняльний аналіз ефективності алгоритмів розпізнавання плоских та об'ємних елементів на основі 2D мініатюр. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 17-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів. (Харків, 28-30 листопада 2023 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 124–125.

Здобувачкою здійснено аналіз впливу цифрової та оцифрованої 3D-інформації на ефективності алгоритмів розпізнавання плоских та об'ємних елементів для систем машинного зору.

89. Лешкевич С.Г., Добротворський С.С., Басова Є.В., Басов В.В., Харченко О.С. Стратегії створення періодичних структур на поверхні деталей з нержавіючої сталі методом високошвидкісного мікрофрезерування. *MicroCAD-2024* : тези доп. 32-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 22-25 травня 2024 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2024. С. 196.

Здобувачкою запропоновано підхід до формування періодичних мікроструктур на поверхні деталей із нержавіючої сталі методом високошвидкісного мікрофрезерування з використанням цифрової інформації.

90. Приходько В.О., Добротворський С.С., Басова Є.В., Алексенко Б.О., Завадський П., Кощинський М. Дослідження шорсткості поверхні зразка сталі AISI321 після короткоімпульсного наносекундного лазерного оброблення. *MicroCAD-2024* : тези доп. 32-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 22-25 травня 2024 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2024. С. 208.

Здобувачкою прийнято участь у експерименті та проаналізовано вплив короткоімпульсного наносекундного лазерного оброблення на 3D-шорсткість поверхні сталі AISI321.

91. Яковенко І.Е., Пермяков О.А., Басова Є.В., Гаврис В.В. Автоматизація малих та середніх підприємств машинобудівної галузі. *MicroCAD-2024* : тези доп. 32-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 22-25 травня 2024 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2024. С. 238.

Здобувачкою обґрунтовано шляхи автоматизації технологічних процесів у МСП машинобудівної галузі, узагальнено висновки.

92. Бондар Д.В., Басова Є.В., Водка О.О. Покращення точності виявлення дефектів за допомогою аналізу 2D-зображень шляхом розпізнавання глибини із застосуванням стереовізії. *MicroCAD-2024* : тези доп. 32-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 22-25 травня 2024 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2024. С. 1284.

Здобувачкою запропоновано підхід до підвищення точності виявлення дефектів машинобудівної продукції на основі аналізу оцифрованої інформації із використанням методів стерео-візії для визначення глибини.

93. Бондар Д.В., Басова Є.В. Порівняльний аналіз конвертації ML-моделей для мобільних платформ на прикладі алгоритму пошуку дефектів на виробництві з використанням 2D зображень. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : зб. тез доп. 18-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів. (Харків, 19-22 листопада 2024 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2024. С. 188.

Здобувачкою здійснено аналіз інформації та узагальнено висновки.

94. Яковенко І.Е., Пермяков О.А., Басова Є.В., Льїн Д.О. Автоматизація малих та середніх машинобудівних підприємств України на основі цифрових інновацій. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези 11-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків - Краматорськ - Тернопіль, 09 - 12 травня 2024 р.). Харків: Impress, 2024. С. 164.

Здобувачкою визначено ключові напрями впровадження цифрових інновацій для автоматизації технологічних процесів малих та середніх машинобудівних підприємств.

95. Добротворський С. С., Басова Є. В., Кошчінський М. Забезпечення стійкості змочування поверхні нержавіючої сталі за рахунок fs-імплементації графену при лазерній модифікації поверхні агрегатів подвійного призначення. *Нові технології в машинобудуванні* : тези доп. 34-ї Всеукр. конф. (Харків, 4-7 вересня 2024 р.). Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2024. С. 132.

Здобувачкою виконано практичні дослідження та узагальнені висновки щодо застосування fs-імплементації графену при лазерній модифікації поверхні нержавіючої сталі для забезпечення стійкості змочування функціональних елементів агрегатів подвійного призначення.

96. Добротворський С. С., Басова Є. В., Завадський П. Дослідження параметрів шорсткості та твердості титановмісної сталі AISI321 структурованої наносекундним лазерним опроміненням. *Нові технології в машинобудуванні* : тези доп. 34-ї Всеукр. конф. (Харків, 4-7 вересня 2024 р.). Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2024. С. 133.

Здобувачкою виконано практичні дослідження, здійснено аналіз отриманих результатів та узагальнені висновки щодо впливу параметрів наносекундного лазерного опромінення на 3D-шорсткість та твердість титановмісної сталі AISI321.

97. Бондар Д.В., Басова Є.В., Водка О.О. Генерація карт глибин деталі на основі лідару та 2D-аналізу для контролю якості продукції на виробництві. *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2024)* : тези 24-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 20-23 вересня 2024 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2024. С. 33–34.

Здобувачкою запропоновано підхід до підвищення точності контролю якості машинобудівної продукції в технологічній підготовці виробництва шляхом генерації цифрової інформації про глибину деталей на основі оцифрованих даних.

98. Добротворський С.С., Басова Є.В., Трубін Д.В., Завадський П., Кошчінський М. Керування гідрофільністю титанових поверхонь комбінацією механічного та лазерного оброблення. *MicroCAD-2025*: тези доп. 33-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 14-17 травня 2025 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 241.

Здобувачкою обґрунтовано метод двостадійного комбінованого механічного та лазерного оброблення титанових поверхонь для керування їх гідрофільними властивостями за рахунок формування контрольованої 3D-шорсткості.

99. Бондар Д.В., Басова Є.В., Водка О.О. Порівняльний аналіз способів розпізнавання просторових характеристик деталі за допомогою пристроїв з підтримкою LIDAR та ARKIT. *MicroCAD-2025* : тези доп. 33-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 14-17 травня 2025 р.). Харків: НТУ «ХП», 2025. С. 1494.

Здобувачкою проведено аналіз методів розпізнавання просторових характеристик деталей та узагальнено висновки щодо використання оцифрованої інформації у системах промислового контролю якості.

100. Бондар Д.В., Басова Є.В., Водка О.О. Адаптивне розпізнавання екземплярів для промислового контролю якості: подолання синтетико-реального розриву для деталей з листового металу. *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ–2025)* : тези 25-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 25-28 вересня 2025 р.). Харків: НТУ «ХП», 2025. С. 23.

Здобувачкою прийнято участь у розробленні адаптивного методу розпізнавання деталей з листового металу на базі оцифрованої інформації для підвищення точності промислового візуального контролю.

Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи здобувача на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

АНОТАЦІЯ

Басова Є.В. Технологічне забезпечення сталості малих та середніх машинобудівних підприємств в умовах стресу на засадах цифровізації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут, МОН України, Харків, 2026.

Дисертаційна робота є завершеним науково-дослідною роботою, спрямованою на розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми – забезпечення технологічної та виробничої сталості малих і середніх машинобудівних підприємств (МСП) України в умовах дискретно-нестабільної серійності, зовнішніх стресових впливів і динамічних ринкових коливань шляхом впровадження інструментів цифровізації, 3D-інформації та багаторівневого цифрового інжинірингу.

У роботі розроблено теоретичні та методологічні основи забезпечення сталого розвитку МСП на базі варіаційної моделі інтегрального функціонала технологічної гнучкості, який враховує вплив часу прийняття рішень, ринкових збурень та виробничих обмежень. Запропоновано математичну формалізацію процесу сталості у вигляді функціонала $SD(f)$, оптимізованого методом автоматичного планування RPLAN, що дозволило кількісно оцінити часову сталість підприємства до стресових факторів.

Сформульовано й обґрунтовано багаторівневу 3D-концепцію підвищення технологічної сталості МСП, сутність якої полягає в інтеграції цифрових та оцифрованих даних про об'єкт виробництва на нано-, мікро-, мезо-, макро- та глоборівнях. Реалізовано вертикальну і горизонтальну інтеграцію інформаційних потоків у технологічній підготовці виробництва (ТПВ), що забезпечило наскрізну цифровізацію ТПВ МСП. Розроблено модульну ERP систему, що підтримує адаптивне керування ресурсами МСП та на базі цифрової платформи JavaMach Cluster з відкритою архітектурою та інтегрованими модулями, як CAD/CAE/CAPP/CAM, так і модулями по поточному запиту МСП.

Розроблено методику інтеграції QR-коду з багаторівневою 3D-інформацією, що забезпечує динамічну ідентифікацію деталей і технологічних процесів у режимі реального часу. Підтверджено ефективність застосування 3D-моделей у логістиці цеху та глобальних ланцюгах постачання на прикладі виробу типу Mixed-Flow турбіни, де реалізація принципів 3D-візуалізації знизила міжопераційні простої та підвищила точність планування постачань.

Створено принципово новий технологічний ланцюг 3D-підготовки виробництва високотехнологічних вузлів і агрегатів на прикладі турбокомпресора зі змішаним потоком (Mixed-Flow турбіни), що забезпечує адаптацію МСП до хвильових коливань попиту. Підхід передбачає інтеграцію CAE-рішень, цифрових двійників і CFD-моделювання для різнорівневої оптимізації 3D-геометрії лопаток. На основі рівнянь Нав'є–Стокса та RANS-моделей проведено аналіз течії й тиску, що дозволило підвищити ізентропічний ККД без зміни габаритів агрегату, скоротити час перепроєктування та підвищити технологічну сталість виробництва.

Розвинуто 3D-концепцію на мікро- та нанорівнях технологічної підготовки виробництва. Виконано моделювання динаміки коливань тонкостінних елементів методом скінченних елементів, встановлено закономірності технологічної спадковості шорсткості поверхні при двостадійному обробленні та розроблено адаптивну стратегію фрезерування за ізолініями рівних деформацій та власних частот, визначених 3D моделюванням. Проведено дослідження мікро- і наноструктурування поверхонь методами нано- та фемтосекундного лазерного текстурування, що забезпечило формування функціональних мікроструктур (LIPSS), підвищення мікротвердості модифікованої поверхні на 20–30 % без втрати функціональних характеристик, зниження коефіцієнта тертя до 75 % та формування протиобledenінних супергідрофобних та гідрофільних поверхонь.

Розроблено метод ідентифікації технологічних параметрів на основі дискретно-масової моделі й нейронних мереж для прогнозування сил різання та адаптивного керування процесом шліфування. Запропоновано фізично обґрунтований механізм утворення QR-зображень фемтосекундним лазерним текстуруванням на металах як елементів цифрової ідентифікації деталей у ланцюгах постачання.

Результати роботи формують науково-практичну базу для переходу машинобудівних МСП України до моделі цифрової технологічної сталості, яка передбачає безперервну інтеграцію багаторівневої 3D-інформації, швидке адаптування виробництва до стресових факторів і підвищення конкурентоспроможності на ринку.

Ключові слова: гнучке автоматизоване виробництво, технологічна підготовка виробництва, технологічний процес, виробничий процес, життєвий цикл виробу, сталість машинобудівного виробництва, моделювання, оптимізація, адитивні технології, лазерна обробка матеріалів, комп'ютерний інжиніринг, цифровізація, 3D-інформація, Індустрія 4.0.

ABSTRACT

Basova Ye. V. Technological support for the sustainability of small and medium-sized engineering enterprises under stress conditions based on digitalisation principles.
– Manuscript.

Thesis for an Academic Degree of the Doctor of Technical Sciences by specialty 05.02.08 – Mechanical Engineering Technology. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute, MES of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The dissertation is a completed research work aimed at solving an urgent scientific and applied problem – ensuring the technological and production sustainability of small and medium-sized engineering enterprises (SMEs) of Ukraine under conditions of discrete and unstable serial production, external stress factors, and dynamic market fluctuations through the implementation of digitalisation tools, 3D information, and multilevel digital engineering. The work develops theoretical and methodological foundations for ensuring the sustainable development of SMEs based on a variational model of the integral functional of technological flexibility, which considers the influence of decision-making time, market perturbations, and production constraints. A mathematical formalisation of the sustainability process is proposed in the form of the functional $SD(f)$, optimised by the automatic planning method PPLAN, which made it possible to quantitatively assess the temporal stability of an enterprise under stress factors. A multilevel 3D-concept for enhancing the technological sustainability of SMEs has been formulated and substantiated. Its essence lies in the integration of digital and digitised data about the production object at the nano-, micro-, meso-, macro-, and global levels. Vertical and horizontal integration of information flows within technological process planning (TPP) has been implemented, ensuring end-to-end digitalisation of SMEs' TPP. A modular ERP system has been developed to support adaptive resource management of SMEs based on the JavaMach Cluster digital platform with open architecture and integrated modules, including CAD/CAE/CAPP/CAM systems, as well as modules designed according to the current needs of SMEs. A methodology for integrating QR codes with multilevel 3D information has been developed, enabling dynamic identification of parts and technological processes in real time. The effectiveness of 3D models in shop-floor logistics and global supply chains has been confirmed using the Mixed-Flow turbine as an example. The implementation of 3D visualisation principles reduced interoperation downtime and improved the accuracy of supply chain planning.

A fundamentally new technological chain for 3D production preparation of high-tech units and assemblies was created using a Mixed-Flow turbocharger as an example, providing SMEs with adaptability to wave-like demand fluctuations. The approach involves the integration of CAE solutions, digital twins, and CFD modelling for multilevel optimisation of the 3D geometry of blades. Based on the Navier–Stokes equations and RANS models, flow and pressure analyses were carried out, which made it possible to increase the

isentropic efficiency without changing the unit's dimensions, reduce redesign time, and enhance the technological sustainability of production.

The 3D concept has been further developed at the micro- and nano-levels of technological process preparation. The dynamics of thin-walled element vibrations were modelled using the finite element method (FEM); the regularities of surface roughness inheritance during two-stage machining were established, and an adaptive milling strategy was developed along the isolines of equal deformations and natural frequencies determined by 3D modelling. Studies of micro- and nanostructuring of surfaces using nano- and femtosecond laser texturing were conducted, enabling the formation of functional microstructures (LIPSS), an increase in microhardness of the modified surface by 20–30% without loss of functional characteristics, a reduction of the friction coefficient by up to 75%, and the formation of anti-icing superhydrophobic and hydrophilic surfaces. A method for identifying technological parameters based on a discrete-mass model and neural networks has been developed to predict cutting forces and adaptively control the grinding process. A physically substantiated mechanism for generating QR images by femtosecond laser texturing on metals has been proposed as a means of digital identification of parts within supply chains.

The results of the research form a scientific and practical foundation for the transition of Ukrainian engineering SMEs to a model of digital technological sustainability, which ensures continuous integration of multilevel 3D information, rapid adaptation of production to stress factors, and enhanced competitiveness in the market.

Keywords: flexible automated manufacturing, technological process planning, technological process, production processes, life cycle of a part, sustainable manufacturing, machine design, optimisation, additive technologies, laser material processing, computer-aided engineering, digitalisation, 3D information, Industry 4.0.