Коротка інформація про конкурсну роботу

Назва конкурсної роботи:«Науково-технологічні засади наскрізної 3D-цифровізації малих машинобудівних підприємств України для забезпечення їх стійкості в умовах глобальних та воєнних викликів»

Автор: Басова Євгенія Володимирівна, доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».

Конкурсна робота присвячена розв’язанню актуальної науково-прикладної проблеми забезпечення технологічної та виробничої стійкості малих і середніх машинобудівних підприємств України в умовах глобальних кризових впливів, воєнних дій, порушення виробничих і логістичних зв’язків та дискретно-нестабільного попиту. В основу роботи покладено розроблені науково-технологічні засади наскрізної 3D-цифровізації елементів життєвого циклу машинобудівної продукції, спрямовані на підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва, його гнучкості, адаптивності та стійкості в умовах невизначеності.

Запропонована 3D-концепція передбачає системне отримання, аналіз, синтез та інтеграцію цифрової й оцифрованої інформації про об’єкти та процеси виробництва на нано-, мікро-, мезо-, макро- та глоборівнях із забезпеченням її вертикальної та горизонтальної інтеграції. На цій основі розроблено підходи до інтеграції CAD/CAE/CAPP/CAM/ERP-систем, цифрових двійників, засобів автоматизованого планування, прогнозування й оптимізації технологічних процесів, цифрової ідентифікації та простежуваності машинобудівної продукції. Ефективність 3D-концепції обґрунтовано для функціонування підприємств в умовах стресових впливів, зокрема, Force Majeure, воєнних дій та різких коливань попиту.

Розроблені рішення забезпечують формування єдиного цифрового середовища технологічної підготовки виробництва та підтримку прийняття технологічних рішень в умовах обмежених ресурсів і швидкої зміни виробничої ситуації. Практичну реалізацію запропонованих підходів

здійснено під час цифрової технологічної підготовки та виготовлення складних машинобудівних компонентів, моделювання й оптимізації технологічних процесів, прогнозування технічного стану обладнання, керування якістю та цифрової ідентифікації виробів.

Теоретичні положення та працездатність запропонованої 3D-концепції підтверджено комплексом чисельних і експериментальних досліджень на конкретних об’єктах машинобудування різного рівня складності: робочих колесах і лопатках турбомашин, лопатках авіаційних двигунів, колінчастих валах, консольно закріплених тонкостінних деталях, а також функціональних поверхнях деталей із титанових сплавів Ti-6Al-4V та корозійностійкої сталі AISI 321. Такий вибір об’єктів дозволив перевірити наскрізність запропонованого підходу – від формування й аналізу 3D-інформації про мікро- та нанорельєф поверхні до цифрового моделювання деталі, технологічного процесу та функціонування складного машинобудівного агрегату.

На мезо- та макрорівнях теоретичні положення перевірено під час дослідження відповідальних деталей турбомашин. Для робочого колеса турбіни виконано 3D-моделювання лопаток і CFD-аналіз газодинамічних процесів, що дозволило визначити розподіли тиску та швидкості, локалізувати зони турбулентності та встановити вплив геометрії лопатки на ефективність роботи турбіни. Встановлено, зокрема, суттєвий вплив кута відхилення лопаток на продуктивність турбіни; для досліджених умов найбільшу ефективність при 100 % навантаженні отримано за кута відхилення −35°. На цій основі розроблено цифровий двійник турбіни та математичну модель керування 3D-геометричними параметрами лопатки, що забезпечує багатоваріантну оптимізацію технологічних рішень.

Наукову обґрунтованість підходу додатково підтверджено дослідженнями динамічної поведінки тонкостінних деталей, лопаток і колінчастих валів. На основі чисельного моделювання та експериментальних вимірювань установлено, що критичні власні частоти поперечних коливань

досліджених лопаток переважно знаходяться в діапазоні 150–600 Гц, а похибка визначення зон небезпечних деформацій за допомогою 3D-моделювання не перевищувала 5 % порівняно з експериментом. Використання адаптивних режимів оброблення, сформованих на основі цифрових моделей, забезпечило зменшення максимальних геометричних відхилень деталей на 12–18 %. Створено цифрові двійники колінчастих валів і лопаток авіаційних двигунів та експериментально підтверджено вплив жорсткості закріплення заготовки на частотні й вібраційні характеристики деталі.

На мікро- та нанорівнях теоретичні положення 3D-концепції перевірено експериментально на поверхнях деталей із Ti-6Al-4V та AISI 321 після механічного та короткоімпульсного лазерного оброблення. Із застосуванням 3D-оптичної та атомно-силової мікроскопії визначено комплекс висотних, просторових, функціональних і гібридних параметрів топографії за ISO 25178 та доведено, що для прогнозування функціональних властивостей поверхні недостатньо традиційної оцінки за одним параметром шорсткості: необхідне багатопараметричне 3D-представлення поверхні.

Експериментально встановлено **т**ехнологічну спадковість двостадійного оброблення «фрезерування–лазерне короткоімпульсне текстурування»: вихідна мікрогеометрія поверхні після фрезерування визначає умови подальшого формування лазерних мікро- і наноструктур, а сформована 3D-топографія, своєю чергою, безпосередньо впливає на функціональні та трибологічні властивості поверхні. На зразках із титанового сплаву Ti-6Al-4V експериментально підтверджено можливість керованого формування мікро- і нанорельєфу та встановлено взаємозв’язок між параметрами просторової геометрії поверхні, умовами змащування, коефіцієнтом тертя і зношування. Зокрема, для лазерно текстурованої поверхнізастосування графіту забезпечило зниження коефіцієнта тертя з 0,88-1,0 до 0,25-0,3, а hBN – з 0,88-0,95 до 0,35-0,5; 3D-аналіз профілів слідів зношування також підтвердив меншу інтенсивність зношування

текстурованої поверхні порівняно з вихідною фрезерованою.Таким чином, доведено, що керування геометричними характеристиками поверхні на мікро- і нанорівнях є не лише засобом забезпечення заданої шорсткості, а й інструментом цілеспрямованого формування експлуатаційних властивостей машинобудівних деталей, зокрема їх трибологічної поведінки та зносостійкості.

Одже, наукова новизна експериментально підтвердженої частини роботи полягає у розвитку багаторівневої 3D-концепції від макрогеометрії та динаміки відповідальних деталей до мікро- і нанотопографії їх функціональних поверхонь; установленні кількісних взаємозв'язків між цифровими параметрами об'єкта, умовами його технологічного оброблення та функціональними характеристиками; доведенні можливості використання цифрових двійників і багаторівневої 3D-інформації для прогнозування та оперативного коригування геометричних, динамічних, газодинамічних і трибологічних характеристик машинобудівних компонентів. Уперше цифрові двійники наукоємних виробів інтегровано з багаторівневою 3D-інформацією для оперативного прогнозування та коригування геометричних, газодинамічних і термодинамічних параметрів як інструменту забезпечення технологічної стійкості машинобудівних МСП.

Практичну результативність роботи підтверджено впровадженням розроблених підходів на машинобудівних підприємствах України. У ПрАТ «ТУРБОГАЗ» упроваджено методику цифровізації технологічної підготовки виробництва, цифрові двійники, засоби прогнозування технічного стану обладнання та оптимізації параметрів механічного оброблення. За результатами апробації зафіксовано підвищення продуктивності виробничих процесів на 8,7 %, зниження витрат на технічне обслуговування на 10,5 % та зменшення відхилень параметрів виробів на 4,3 %. У ТОВ «АРТ ТЕК» упроваджено цифрові підходи до технологічної підготовки виробництва, уніфікації елементів продукції, ERP- та проєктного управління, що

забезпечило скорочення виробничого циклу створення нової продукції щонайменше у 1,5 раза.

Окремі науково-технічні результати захищено патентом України на винахід № 129166 «Пристрій для випробування матеріалів на гідро-/газоабразивний знос», зареєстрованим 29.01.2025, серед винахідників якого – Є. В. Басова. Результати роботи також упроваджено в освітній процес НТУ «ХПІ» під час підготовки бакалаврів і магістрів за напрямами прикладної механіки та машинобудування.

Наукова та суспільно-економічна значущість роботи полягає у формуванні науково-технологічного підґрунтя цифрової трансформації малих і середніх машинобудівних підприємств України та підвищенні їхньої здатності зберігати виробничу спроможність, оперативно перебудовувати технологічні процеси й адаптуватися до глобальних, економічних та воєнних викликів. Запропоновані засади наскрізної 3D-цифровізації створюють передумови для підвищення конкурентоспроможності, технологічної незалежності та стійкості українського машинобудування.