

ВІДГУК  
офіційного опонента, доктора технічних наук, професора  
Пасічника Віталія Анатолійовича  
на дисертаційну роботу  
**Ступницького Вадима Володимировича**  
**«Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих  
технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу»**,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування

**Актуальність теми дисертації.** Сучасний стан розвитку машинобудування характеризується комплексною комп'ютеризацією всіх етапів підготовки виробництва – від створення конструкції виробу – до промислової реалізації керуючих програм та технологій. В умовах ринкової економіки конкурентну боротьбу успішно витримують тільки підприємства, які застосовують у своїй діяльності сучасні інформаційні технології. Досвід, накопичений у процесі впровадження різноманітних автономних інформаційних систем, дозволяє констатувати необхідність інтеграції різних ІТ-технологій в єдиний комплекс, що базується на створенні в рамках підприємства або групи підприємств (віртуального підприємства) інтегрованого інформаційного середовища, що підтримує всі етапи життєвого циклу машинобудівної продукції.

На сучасному етапі найбільш розвиненими є програмні засоби для проектування і конструювання (CAD/CAE-системи) самого виробу, а також системи для керування технологічним обладнанням і виробничими процесами (CAM-системи). Практика сьогодення вказує, що вимоги до експлуатаційних властивостей виробів машинобудування формуються виключно на етапі конструювання виробів, а функція технологічної системи полягає лише у забезпеченні сформульованих конструктором параметрів геометричної точності та якості виробів з найменшими витратами. При цьому не враховуються чинники, що можуть суттєво вплинути на забезпечення функціональних властивостей об'єктів виробництва, які визначаються структурою та параметрами технологічних процесів та операцій їх виготовлення. До таких параметрів можна віднести мікротопологію поверхонь, яка формалізує не лише висотні та крокові показники мікронерівностей, але й розподіл форми шорсткості на виступи та впадини, а також залишкові напруження (розтягу чи стиску) та залишкові деформації. Наприклад, параметр  $Rpk$  (середнє арифметичне значення висот вершин мікропрофілю поверхні) має домінуючий вплив на величину зношування матеріалу деталі в процесі припрацювання, параметр  $Rk$  (глибина усіченого профілю) найбільше впливає на термін служби деталі (допустиме зношування найбільш відповідальною функціональною поверхнею), а параметр  $Rvk$  (середнє арифметичне значення глибин мікрозападин профілю) відображає здатність поверхні до утримування мастила тощо. В свою чергу, залишкові напруження стиску позитивно впливають на втомну міцність деталей. Аналогічні висновки можна навести щодо впливу цих показників на інші параметри зносостійкості, фрикційної якості трибоспряжень, мастилоутримуючої здатності та корозійної стійкості поверхонь. Слід констатувати, що такий аналіз впливу технологічних чинників на функціональну здатність виробів машинобудування в сучасних системах конструкторсько-технологічної підготовки виробництва не реалізований. Вирішенню цієї актуальної для розвитку машинобудування проблеми і присвячена рецензована дисертаційна робота.

Виходячи з аналізу вищенаведених аргументів, вважаю, що дисертаційна робота Ступницького В.В. «Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу» спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми розвитку систем підтримки життєвого циклу виробу машинобудування в частині інтеграції у них на принципах паралельного інжинірингу системи інформаційної підтримки технології формоутворення виробів, основним результатом якої є впровадження функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва.

Вищевикладене характеризує тему дисертації Ступницького В.В. як актуальну та підтверджує її відповідність вимогам за ознакою «актуальність обраної теми дисертації»

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірності та новизни.** Обґрунтованість результатів, одержаних у дисертаційній роботі Ступницького В.В. забезпечена відповідністю основним науковим положенням технології машинобудування, системного аналізу, математичних методів оптимізації та імітаційного моделювання, що в сукупності відповідають даним, наведеним в ґрунтовній базі робіт вітчизняних та закордонних вчених.

Припущення та спрощення, що покладені в основу теоретичних досліджень, є коректними, підтверджуються результатами власних теоретичних, експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання. Сформульовані положення і висновки по роботі, що рецензується, не суперечать фундаментальним теоретичним положенням і прикладним результатам сучасної науки про технологію машинобудування. Достовірність отриманих у дисертації теоретичних напрацювань, положень, висновків і рекомендацій підтверджено достатньо точним збігом їх з експериментальними даними, та апробацією отриманих результатів на конференціях і семінарах, а також впровадженням розроблених математичних методик у виробництво та використання їх у міжнародному науковому проекті (Жешувська Політехніка, Республіка Польща).

Мета дисертаційного дослідження щодо розвитку технологічних основ прогнозування на етапі конструкторсько-технологічного підготовки виробництва експлуатаційних властивостей деталей машин шляхом формування й оптимізації комплексу параметрів якості поверхонь на засадах функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення виробів *вирішена повністю*.

**Новизна наукових результатів, отриманих у роботі,** полягає у тому, що в дисертаційній роботі застосовано оригінальний міждисциплінарний підхід до проектування функціонально-орієнтованих технологічних процесів, суть якого полягає у визначенні найбільш ефективних методів рішення окремих завдань цілісного та гнучкого процесу проектування, способів поєднання окремих проектних процедур різнорідних CAD/CAE/CAPP/CAM, що в комплексі дало змогу реалізувати вплив структури та параметрів технологічних операцій на формування оптимального комплексу експлуатаційних властивостей виробу.

У процесі вирішення даної проблеми були отримані такі нові наукові результати:

– Запропонована структура автоматизованої технологічної системи формоутворення виробів (CAF-системи), визначені та розроблені окремі модулі цієї системи, реалізовані її ітераційні та рекурентні зв'язки з системою інженерного аналізу (CAE-системою) та

системою конструювання виробу (CAD-системою), що в сукупності органічно доповнює комплекс CAD/CAE/CAPP/CAM систем та забезпечує прогностичну можливість імітаційного моделювання і встановлення залежності основних кваліметричних показників виробу від структури і параметрів технологічного процесу механічного оброблення деталі.

– Структурні удосконалення існуючих систем інженерного аналізу в частині реалізації підсистем мікроінженерного моделювання (моделювання динаміки руйнування і кінетики зношування найбільш важливих функціональних поверхонь виробу, модель втомних навантажень, модель забезпечення несучої здатності мастильного шару тощо), ґрунтовні методологічні дослідження впливу режимів механічного оброблення деталей та геометрії різального інструменту на параметри напружено-деформаційного, термодинамічного, мікрогеометричного, структурно-фазового стану оброблюваних поверхонь методом скінченних елементів при обробленні для деталей з основних репрезентативних матеріалів машинобудівних виробів, комплекс математичних моделей для формалізованого опису мікротопології оброблюваних поверхонь з врахуванням геометрико-кінематичної, вібраційної та деформаційної складової мікронерівності профілю, запропоновано та обґрунтовано метод імітаційного та математичного моделювання залишкових напружень I та II роду, що базується на аналізі картин напружено-деформованого та термодинамічного стану оброблюваних поверхонь, отриманих на основі теорії скінченних елементів в сукупності дозволяють суттєво удосконалити функції прогнозування експлуатаційних властивостей виробів на етапі конструкторсько-технологічного підготовлення машинобудівного виробництва.

– Отримала подальший розвиток методологія оптимізації структури та параметрів технологічного процесу шляхом використання в якості функції мети інтегрального кваліметричного показника, який системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо найбільш навантажених поверхонь виробу.

– Вперше розроблена методика розрахунку відносних показників експлуатаційної якості деталей машин, що визначаються формуванням показників мікротопології оброблюваних поверхонь, залишкових напружень та деформацій, залежних від структури та параметрів технологічного процесу.

**Важливість результатів дисертаційної роботи для науки і практики.** Усі теоретичні розробки дисертації доведені автором до конкретних практичних рішень у вигляді інженерних методик проектування, програмних реалізацій методів та алгоритмів імітаційного реологічного моделювання, вибору критеріїв руйнування матеріалу, градієнтності кінцево-елементної сітки та аналізу методів розрахунку реологічних моделей формоутворення поверхонь деталі, методологічних підходів до багатокритеріальної структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного та впровадженні результатів дослідження в промислове виробництво, що підтверджено відповідними актами. Дана дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетної роботи МОН України: «Проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу», де автор був керівником проекту; та робіт за міжнародною НДКР «Вимірювання та моделювання залишкових напружень у зразках сплавів» за замовленням Жешувської Політехніки (Республіка Польща), де автор був відповідальним виконавцем.

**Рекомендації щодо використання результатів дисертації.** Результати роботи можуть бути використані, як комплекс методів, алгоритмів та програмних засобів для проектування технологічних процесів як на машинобудівних підприємствах, так і у науково-дослідних підрозділах, які спеціалізуються на виконанні проектів в галузі розробки та впровадження інтегрованих автоматизованих систем підготовки машинобудівного виробництва. Запропоновані автором дисертації математичні моделі, алгоритми та робочі програми є складовими вперше розробленої автоматизованої системи формування виробів (CAF-системи). Розроблені в дисертаційній роботі методики дозволили провести системний аналіз впливу структури та параметрів технологічного процесу на формування залишкових напружень та деформацій поверхонь після механічного оброблення деталей авіаційної техніки та параболічних антен з титано-нікелевих та алюмінієвих сплавів для ДП «Закарпатське вертолітне виробниче об'єднання» ДК «Укроборонпром». Крім того, результати досліджень впроваджені на ТЗОВ «ІнтерПЕТ» (м. Львів) для підвищення якості та продуктивності оброблення деталей пресформ та штампів та на ТДВ «ЛЬВІВАГРОПРОЕКТ» для підвищення ефективності технологічних процесів механічного оброблення деталей машин та механізмів сільськогосподарського призначення.

**Повнота викладення основних результатів дисертації.** За результатами досліджень опубліковано 59 наукових праць, з яких 27 статей опубліковано у фахових наукових виданнях України (з них 18 одноосібних), 6 статей – у закордонних періодичних виданнях та 22 публікації – у збірниках матеріалів наукових конференцій та симпозіумів.

Дисертаційна робота є підсумком тривалого самостійно виконаного дослідження автора. Усі положення, які виносяться на захист, отримано автором особисто. Із наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті ідеї та положення, які розроблені автором. Все викладене вище доводить відповідність дисертації Ступницького В.В. вимогам за ознакою «повнота опублікованих результатів».

**Оцінка змісту дисертації, її завершеності та оформлення.** Структура дисертаційної роботи є логічною, вона оформлена згідно встановлених вимог та відповідає загальноприйнятим нормам для наукових досліджень. Матеріали дисертації викладено у 6 розділах загальним обсягом 535 сторінок, які, крім текстового наповнення, включають 132 рисунки, 14 таблиць, 8 додатків, список використаних джерел з 327 найменувань. Загалом, обсяг дисертації без врахування 62 рисунків та 11 таблиць на окремих сторінках, додатків на 111 сторінках, списку використаних джерел на 33 сторінках не перевищує рекомендований обсяг докторської дисертації – 13 ум.друк.арк.

Дисертаційна робота написана грамотно, стиль викладення матеріалу – науковий. Застосована в роботі наукова термінологія є загальновизнаною, результати теоретичних і практичних досліджень, нові наукові положення, висновки і рекомендації доступні для сприйняття та використання.

Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи, написаний грамотно та з використанням сучасної наукової термінології. Оформлення дисертаційної роботи та автореферату в цілому відповідає вимогам державних стандартів і чинного «Положення про присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника».

Дисертаційна робота Ступницького В.В. структурована й відповідає вимогам до наукових робіт. Обґрунтувавши у *вступі* актуальність, вказавши зв'язок із науковими

програмами і планами, автор формулює мету і завдання, які слід вирішити задля її досягнення, наукову новизну, практичну значимість результатів досліджень.

*У першому розділі* роботи проведено аналіз сучасних тенденцій розвитку технологічного забезпечення інтегрованих CAD/CAE/CAPP/CAM-систем, розробки методів прогнозуючого моделювання процесів механічного оброблення виробів та засобів їх автоматизованого проектування. Здійснено аналіз проблем розвитку систем забезпечення життєвого циклу виробів машинобудування. Вказані напрямки, які сприяють підвищенню ефективності технологічного етапу інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва. Вперше сформульовані концептуальні особливості проектування об'єктно-орієнтованих та функціонально-орієнтованих технологічних процесів машинобудівного виробництва. На основі проведеного аналізу в розділі сформульована мета і задачі дослідження, які за своєю науковою та практичною значущістю відповідають рівню докторської дисертації. Також вважаю, що виконаний автором дисертаційної роботи аналіз літературних вітчизняних і закордонних джерел, їх систематизація та узагальнення має наукову значимість.

*Другий розділ* дисертаційної роботи присвячений розробленню методології функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів на основі прогнозуючого імітаційного моделювання процесів формоутворення виробів. Запропонована алгоритмічна структура та особливості використання автоматизованої технологічної системи формоутворення (CAF-системи), як основи синтезу функціонально-орієнтованих технологій. Запропонована методологія реологічного моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану матеріалу заготовки в зоні різання на основі теорії скінчених елементів. Проведені дослідження та подані рекомендації щодо використання розрахункових процедур у імітаційних моделях, вибору ефективної градієнтної сітки, використання оптимальних за рівнем адекватності силових, деформаційних та енергетичних критеріїв руйнування матеріалів в процесі формоутворення деталей. Розроблена в дисертації методика моделювання є базою для реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

*У третьому розділі* дисертації автор наводить результати методологічного аналізу впливу силових та температурних чинників технологічних переходів механічного оброблення деталей з найбільш репрезентативних машинобудівних матеріалів на напружено-деформований стан заготовки в зоні формоутворення методом скінчених елементів. Проведений проблемно-орієнтований аналіз впливу геометричних параметрів різальних інструментів на формування силових та температурних чинників процесу формоутворення поверхонь деталей. Крім того, наведені результати дослідження адекватності розроблених в дисертації моделей відомим теоретичним положенням теорії різання та технології машинобудування.

*Четвертий розділ* дисертаційної роботи містить опис комплексу моделей та методик формування параметрів мікрогеометрії та якості поверхонь деталей машин деталей як результат роботи автоматизованої технологічної системи формоутворення. Згідно концептуальної моделі формування основних параметрів мікротопології поверхонь наведені результати розрахунку геометрико-кінематичної, вібраційної та деформаційної складової мікронерівності. Для вирішення поставленої задачі побудована та досліджена нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи, що також враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому переході. Наведені результати реологічного моделювання та аналіз впливу технологічних чинників на формування залишкових напружень I та II роду, а також

залишкових деформацій. З метою верифікації результатів імітаційного моделювання проведений ряд експериментальних досліджень, результатом яких є оцінка взаємного впливу технологічних чинників на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталей лезовим інструментом, за допомогою акустопружного методу, який полягає в аналізі зміни швидкості проходження ультразвукових хвиль по оброблюваних поверхнях деталей.

*П'ятий розділ* дисертації присвячений розробленню методології структурно-параметрична оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу на основі розрахунку інтегрального кваліметричного показника, який системно характеризує функціональні властивості навантажених поверхонь виробу. Цей показник формується на основі поєднання технологічних складових локальних критеріїв – інтенсивності зношування функціональних поверхонь, коефіцієнту запасу за показником втомної міцності, показника динамічної якості трибоспряжень, коефіцієнту запасу рідинного трибоконтракту функціональних поверхонь деталі та параметру корозійної стійкості (фретінг-корозії) в умовах потенційного функціонування виробу в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь.

*У шостому розділі* дисертації автор наводить узагальнюючий приклад ефективності застосування теоретичних положень проектування функціонально-орієнтованого технологічного процесу. Цей розділ має на меті продемонструвати використання розроблених аналітичних методик та моделей на реальному прикладі вибору оптимального процесу оброблення деталей прес-форм з врахуванням умов їх потенційної експлуатації у виробі. В результаті проведених досліджень доведено адекватність результатів аналітичного та імітаційного моделювання реальним процесам та підтверджена теза про те, що формування функціонально-орієнтованого технологічного процесу створює передумови забезпечення більш ефективної експлуатаційної якості виробів машинобудівного виробництва.

*У додатках* наведені результати досліджень математичних моделей та експериментальних досліджень, на основі яких був зроблений висновок про адекватність представлених теоретичних положень реальним процесам формоутворення виробів машинобудування.

Все викладене вище дозволяє стверджувати, що представлена дисертація є закінченою науковою роботою, а отримані в ній результати, що в своїй системній сукупності вирішують важливу наукову-практичну проблему підвищення ефективності експлуатаційних властивостей деталей машин шляхом формування комплексу оптимальних параметрів якості поверхонь шляхом впровадження функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення виробів, проектування яких здійснюється засобами паралельного інжинірингу.

### **Зауваження до дисертації.**

Поряд з наведеними вище позитивними якостями дисертаційної роботи, що рецензується, вважаю за необхідне зробити такі зауваження:

1. Формулюючи мету автор робить акцент на «підвищенні експлуатаційних властивостей ...». Сама задача підвищення експлуатаційних властивостей не є загальною для всіх виробів машинобудування. Частіше актуальнішою є задача забезпечення певних експлуатаційних властивостей виробів завдяки комплексу технологічних методів. Проте в контексті суті даної роботи слід говорити не про «підвищення» і не про «забезпечення», а про прогнозування експлуатаційних властивостей на етапі конструкторсько-технологічного підготовлення виробництва на базі інформаційної підтримки формоутворення виробів.

2. В структурі інтегрованої модернізованої системи конструкторсько-технологічного підготовки виробництва (рис.1.4, в авторефераті – рис.1) поряд із нововведеною «автоматизованою технологічною системою формоутворення» присутня також «система стабілізації процесу різання». В роботі недостатньо уваги приділено роз'ясненню суті та функцій останньої. Також слід зауважити, що тільки за рахунок прогнозування умов стабілізації процесу різання сам процес стабілізувати неможна, потрібні відповідні технічні засоби, як елементи технологічної оброблювальної системи, які під час процесу різання будуть забезпечувати створення умов, визначених попередньо. Таким чином, повнофункціональна система стабілізації процесу різання може мати два модулі, один з яких – аналітичний, що реалізується на комп'ютері, а другий – програмно-інформаційне та технічне оснащення верстату.
3. При порівнянні підходів до визначення кута зсуву автор вказує, що «похибка теоретичних та експериментальних досліджень складає лише 2,9%». Зазначу, що мова йде не про натурні експериментальні дослідження, а про застосування чисельних методів комп'ютерного моделювання, тобто порівняння відбувається по суті двох теоретичних методів, хоча моделі, закладені у них суттєво різняться як за суттю, так і за методикою обчислення.
4. Приступаючи до опису математичного моделювання вібраційної складової мікронерівності поверхні в процесі її обробки (п. 4.1.2) автор приймає систему координат XYZ, яка відрізняється розташуванням осей від прийнятої в теорії різання, що ускладнює сприйняття інформації. Тут саме слід зауважити, що подана на рис. 4.4 3D-схема моделі технологічної системи різання з пружними зв'язками представлена лише частково і, по суті, відображає лише взаємодію елементів в зоні різання.
5. Автор застосовує один і той самий символ  $r$  для позначення двох різних величин. Спочатку ним позначається радіус округлення різальної крайки (див. рис. 4.6, в авторефераті – рис.6) і майже одразу використовує цей символ для позначення радіусу при вершині. Краще було б використовувати для їх позначення різні символи.
6. Призначення вагових коефіцієнтів у підпрограмі лінійного нормування кваліметричних критеріїв оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу має вельми суб'єктивний характер, а їх співвідношення суттєво впливає на пошук оптимального рішення. Таким чином, знайдене рішення буде оптимальним тільки за умови, що користувач підпрограми кваліфіковано визначає їхні значення на основі минулого досвіду експлуатації цього й інших виробів. Для нових же виробів пошук оптимального значення теоретично не є доведеним.
7. Зауваження щодо оформлення автореферату й дисертації:
  - a. В роботі зустрічаються друкарські помилки. Так при основному застосуванні терміну «метод скінчених елементів – МСЕ», подекуди зустрічаються «кінцевий елемент», «МКЕ». Також є друкарська помилка у прізвищі автора одного з поширених критеріїв, а саме – Кохрена.
  - b. На граф-схемі «алгоритму направлено пошуку альтернативних та оптимальних параметрів...» (рис. 5.4) кілька разів для позначення розгалуження застосовується фігура для циклів із відомою наперед кількістю повторів.
  - c. Рис. 9 автореферату представлений у виді поганому для сприйняття. Так саме певна кількість графічного матеріалу по тексту дисертації, в основному це графіки, має дуже дрібні підписи шкал осей, що утруднює сприйняття інформації.



**Заключна оцінка дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота Ступницького В.В. є завершеною науковою працею і отримані при її виконанні результати показують нове вирішення актуальної науково-практичної проблеми прогнозування на етапі конструкторсько-технологічного підготовки виробництва експлуатаційних властивостей деталей машин шляхом оптимізації комплексу параметрів якості поверхонь на базі впровадження функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення виробів, проектування яких здійснюється засобами паралельного інжинірингу.

Результати дисертаційного дослідження повною мірою опубліковані у фахових наукових виданнях, у закордонних публікаціях, широко апробовані на наукових конференціях. Зроблені в роботі висновки, пропозиції та рекомендації мають високу наукову та практичну цінність. Зміст автореферату є ідентичним до основних положень, викладених у дисертації, і достатньо повно відображає зміст, висновки і практичні рекомендації.

Вважаю, що дисертаційна робота «Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу» відповідає чинним в Україні вимогам, а її автор Ступницький Вадим Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

Офіційний опонент,  
професор, доктор технічних наук,  
завідувач кафедри інтегрованих  
технологій машинобудування  
Національного технічного Університету України  
«Київський політехнічний інститут»



В.А.Пасічник

Підпис професора, д.т.н.  
В.А.Пасічника засвідчую  
Вчений секретар НТУУ «КПІ»




В.А.Мельниченко