

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Шипуль Ольги Володимирівни

«Наукові основи прецизійного термоімпульсного оброблення
детонувальними газовими сумішами»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки

Дисертаційна робота О. В. Шипуль присвячена дослідженням прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами, що відповідають двом напрямкам досліджень за паспортом спеціальності 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки, зокрема математичному моделюванню процесів фізико-технічної обробки матеріалів, й розробці систем автоматизованого проектування технологічних процесів фізико-технічної обробки та обладнання. Дисертаційна робота виконана в рамках низки прикладних досліджень й розробок, які проводилися в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» протягом близько 15 років.

1. Актуальність теми дисертації

Сучасні вимоги до промислових виробництв високоточної продукції формуються не тільки під впливом ринкових законів конкурентоспроможності, а й постійно зростаючим рівнем прецизійності й, як наслідок, потреби у науковій обґрунтованості технологічних рішень фінішних операцій оброблення. Застосування автоматизованих систем при проектуванні технологій та обладнання прецизійного оброблення є запорукою стабільної високої якості отримуваної продукції. У той же час, перспективний з точки зору продуктивності й універсальності термоімпульсний метод фінішного прецизійного оброблення не відповідає вказаним вище вимогам, й тому, є актуальною вирішувана у поданій дисертації науково-технічна проблема комплексної автоматизації проектування технології й обладнання фінішного прецизійного оброблення продуктами згоряння газових сумішей на основі математичного моделювання процесів фізико-технічного оброблення матеріалів і науково обґрунтованих технічних рішень виконавчих систем обладнання. Крім того, актуальною проблемою фізико-технічного оброблення є визначення закономірностей стану складного об'єкта оброблення під дією ланцюга пов'язаних і взаємовпливових швидкоплинних процесів газодинамічної течії хімічно-реагуювальних газових сумішей і процесів теплообміну, на вирішення якої спрямована подана дисертація.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота Шипуль Ольги Володимирівни має загальний обсяг 417 сторінок, з яких 279 сторінок є основним текстом. Дисертація містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, відповідає вимогам, нормам і правилам проведення наукових досліджень, має струнку загальну структуру, логічно побудована. Вона являє собою комплексну роботу, що поєднує числові дослідження за математичними моделями, верифікованими за натурними експериментами, та технологічні аспекти їх застосування.

У *вступі* подано актуальність теми дисертації, мету й основні завдання дослідження, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами, відзначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, наведено інформацію про апробацію й публікації результатів дисертації, структури і обсягу роботи.

У *першому розділі* дисертаційної роботи на підставі огляду тенденцій розвитку прецизійного виробництва, установлення зв'язків промислової чистоти з чинниками якості прецизійних механізмів, критичного аналізу сучасних методів і технологій фінішного зачищення крайок й очищення поверхонь окреслено перспективи прецизійного термоімпульсного оброблення, визначено проблему інтеграції його у коло сучасного виробництва, й сформульовані задачі дослідження зі створення науково обґрунтованих методів, моделей, методик і нових технічних рішень, спрямованих на автоматизацію призначення режимів і обладнання для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами.

Другий розділ роботи присвячено розробленню й верифікації математичних моделей, які описують робочі процеси під час термоімпульсного оброблення, зокрема генерації паливної суміші, ініціації згоряння, горіння за різними режимами й керованого випускання продуктів згоряння. Під час формування математичних моделей було ураховано особливості притаманні робочим процесам термоімпульсного оброблення й для всіх моделей уведено критерії, які забезпечують визначення показників якості, спрямованих на забезпечення прецизійності оброблення. Зокрема в моделі генерації паливної суміші ураховано неізотермічність процесу, високі вимоги до точності дозування компонентного складу паливної суміші, високу впливованість на результат ступеню гомогенності паливної суміші. Математична модель запалювання враховує нестационарне газодинамічне розширення іскрового каналу, нерівноважні хімічні процеси, іонізацію газу, радіаційний теплообмін і електронну теплопровідність, перехідність процесу в електричному розрядному

колі. При побудові математичної моделі горіння початковий склад паливної суміші задавався результатом розв'язання задачі її генерації в камері після етапу витримки. Особливістю математичної моделі випуску продуктів згоряння є використання експериментальних даних для визначення сили тертя на рухомих елементах клапану. На базі розроблених моделей запропоновано метод прискореного визначення питомих теплових потоків з використанням еквівалентної камери, суть якого полягає в тому, що при визначенні осереднених питомих теплових потоків і часу дії ударних хвиль для випадку оброблення деталі складної форми, використовуються результати розрахунку для випадку еквівалентної деталі простої форми.

Третій розділ роботи присвячено розробленню методу визначення позиціонування деталей під час термоімпульсного оброблення. Позиціонування деталей у робочій камері запропоновано визначати, виходячи з мінімізації середньоквадратичного відхилення осередненого за поверхнею деталі питомого теплового потоку. Базуючись на ствердженні, що під час дії ударних хвиль величина питомого теплового потоку визначається частотою їх дії на точки поверхні деталей, ця умова перетворена до мінімізації математичного очікування квадрату відстані між точками поверхні деталі й камери, й остаточно визначено, що оптимальним розташуванням при термоімпульсному обробленні буде таке при якому центри ваги й головні центральні вісі інерції тонких оболонок, натягнутих на внутрішню поверхню камери й зовнішні поверхні деталей співпадають. Для визначення розташування деталей при груповому термоімпульсному обробленні було вперше сформульовано новий клас задач оптимального пакування - задачу найрозрідженого балансного компоунування. Таке компоунування максимізує суму мінімальних відстаней між кожною парою оброблювальних деталей на полиці пристосування, а також між деталями і поверхнею камери. Для розв'язання цієї задачі було застосовано метод ϕ -функцій, що дозволило звести її до задачі нелінійного програмування. Додатково вирішено задачі найрозрідженого балансного компоунування в умовах дії ударних хвиль. Показано, що для отримання найбільш рівномірного розподілу теплових потоків під час дії ударних хвиль найрозріджене компоунування має узгоджуватися з розташуванням зони детонації паливної суміші.

Четвертий розділ роботи присвячено розробці методу визначення режимів термоімпульсного оброблення. Запропонована методика розрахунку режимів термоімпульсного оброблення крайок за кваліметричними показниками, яка базується на моделі оплавлення під дією питомого теплового потоку певної інтенсивності. За результатами числового моделювання встановлено закономірності оплавлення задирок та формування округлення крайки в залежності від їх геометричних параметрів та величин питомого

теплового потоку. Для ряду чистих металів визначена відносна енергоємність термоімпульсного оброблення. На базі побудованого комплексу математичних моделей вперше розроблено метод призначення режимів термоімпульсного оброблення крайок на основі сумісного вирішення задач про визначення енергетичних характеристик устаткування і стану крайки під впливом питомого теплового потоку з відомою інтенсивністю, який дозволяє призначати технологічні параметри обробки крайок за значеннями кваліметричного показника враховуючи граничні величини питомого теплового потоку. Розроблено блок-схему визначення міцнісних обмежень й алгоритм автоматизованого призначення технологічних параметрів термоімпульсного оброблення. Визначено вимоги до точності забезпечення питомого теплового потоку виходячи зі встановлених стандартом допусків на відхилення форми крайки. З урахуванням раніше встановленому зв'язку між точністю компонентного складу й відхиленням теплового потоку визначено вимоги до точності дозування компонент паливної суміші: від 0,1 до 0,5 %. Виходячи з тих же умов система керування термоімпульсною установкою повинна забезпечувати завдання часу оброблення з похибкою від 0,006 до 0,01 с.

П'ятий розділ роботи присвячено створенню автоматизованого обладнання для прецизійного термоімпульсного оброблення. Для забезпечення встановлених вимог щодо точності дозування компонент паливної суміші на рівні 0,1% під час прецизійного термоімпульсного оброблення запропоновано використання способу генерації, за якого здійснюють одночасне подання компонентів через отвори із критичним перерізом. При цьому компоненти суміші подаються з попередньо наповнених проміжних посудин регульованого об'єму з забезпеченням рівної температури газів в проміжних посудинах протягом витікання. Розроблено й виготовлено генератор паливної суміші, який реалізує запропонований спосіб. Розроблено й виготовлено блок високоенергетичного іскрового запалювання з регульованою енергією іскрового розряду. Для калібрування числових моделей розроблено та виготовлено модульний автономний автоматичний реєстратор експериментальних даних, який не потребує з'єднання зі зовнішньою вимірювальною апаратурою. Для керування та моніторингу роботи автоматизованого обладнання термоімпульсного оброблення газовими сумішами розроблено методику побудови цифрових близнюків на основі комбінації повномасштабних моделей 3D й ROM моделей зниженого порядку робочих процесів оброблення. Розроблено й виготовлено систему автоматизованого числового керування й контролю виконавчих процесів прецизійного термоімпульсного обладнання. Передбачена можливість синхронізації зовнішніх вимірювальних пристроїв із внутрішнім циклом системи ЧПК.

Слід підкреслити, що результати дисертаційної роботи отримані в рамках чітко поставлених задач із застосуванням адекватних засобів досліджень. Усі розділи є взаємопов'язані і спрямовані на вирішення поставленої проблеми та задач дисертації.

Дисертація та автореферат мають логічне викладення, оформлені згідно вимог стандарту, мають наочність, а стиль матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій цілком відповідає науковим нормам і адекватно передає зміст роботи. В авторефераті повністю розкрито основні результати й положення, що виносяться на захист, та вірно відображено зміст дисертаційної роботи.

За змістом, метою та розв'язуваною проблемою дисертація повністю відповідає паспорту спеціальності 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки.

Базуючись на поданому звіті перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Шипуль Ольги Володимирівни є результатом її самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

3. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Дисертанткою виконано методично послідовне і ґрунтовне дослідження з використанням сучасних методів теоретичного й експериментального аналізу. Для вирішення поставлених завдань і отримання основних результатів дисертаційної роботи застосовувалися класичні методи механіки деформованого твердого тіла й механіки руйнування, обчислювальної газодинаміки, включно з методами дослідження багатокомпонентних і багатофазних течій, у тому числі з рухомими границями; моделювання турбулентних течій реагуювальних речовин з урахуванням стискуваності, теплообміну, фазових переходів, емпіричні методи дослідження газодинамічних процесів із плануванням факторного експерименту, методи аналітичної й обчислювальної геометрії та метод ϕ -функцій. Експериментальні дослідження газодинамічних процесів та процесів генерації самостабілізованої високовольтової імпульсної дуги та системи ініціювання детонації з плануванням факторного експерименту проведені на спеціально розробленому і виготовленому обладнанні. Достовірність одержаних результатів забезпечується верифікацією й калібруванням розроблених моделей числових досліджень за натурними експериментами.

Дисертанткою здобуто низку **нових наукових результатів**, до яких слід віднести наступні.

1. Авторкою розроблено комплекс математичних моделей, що описують робочі процеси систем термоімпульсного обладнання, зважаючи на вимоги до прецизійності їхньої роботи, а саме генерації паливної суміші, ініціації горіння,

згоряння паливної суміші, беручи до уваги теплообмін і випускання продуктів згоряння, який ураховує особливості, притаманні робочим процесам систем термоімпульсного обладнання й охоплює комплекс цільових функцій, спрямованих на забезпечення прецизійності їхньої роботи.

2. Для розв'язання задачі просторового розташування деталей під час термоімпульсного оброблення авторкою вперше сформульовано задачу найбільш розрідженої балансної компоновки й розроблено метод її розв'язання, використовуючи апарат ϕ -функцій. Показано, що в разі оброблення одиничної деталі така задача може бути розв'язана суміщенням центрів ваги й головних центральних осей інерції тонких оболонок, які збігаються із зовнішньою поверхнею деталі та внутрішньою поверхнею робочої камери.

3. За результатами дослідження отримав подальший розвиток метод еквівалентної камери щодо задач термоімпульсного оброблення деталей складної форми. На відміну від раніше відомих підходів авторкою показано, що для застосування методу необхідно забезпечити суміщення центрів ваги й головних центральних осей інерції тонких оболонок, що збігаються з поверхнями оригінальної й еквівалентної деталей, а розміри еквівалентної деталі визначати з умови зменшення головних центральних моментів інерції вказаних оболонок відносно головних центральних моментів інерції оригінальної деталі зі зворотним пропорційним відношенням їхніх площ.

4. Авторкою розроблено метод призначення режимів термоімпульсного оброблення крайок на підставі сумісного розв'язання задач про визначення енергетичних характеристик устаткування й стану крайки під впливом питомого теплового потоку з відомою інтенсивністю, який дозволяє призначати технологічні параметри оброблення крайок за значеннями кваліметричного показника, ураховуючи граничні величини питомого теплового потоку.

5. Уперше на основі числового моделювання авторкою встановлено міцнісні обмеження під час термоімпульсного оброблення деталей з литва й деталей після хіміко-термічного оброблення, що дозволило встановити обмеження з часу їхнього оброблення, виходячи з величини осередненого питомого теплового потоку.

Практичну цінність дисертаційної роботи становлять такі основні результати:

— для забезпечення науково обґрунтованих вимог щодо точності дозування компонент паливної суміші на рівні 0,1% під час прецизійного термоімпульсного оброблення запропоновано використовувати спосіб генерації, за якого здійснюють одночасне подання компонентів через отвори із критичним перерізом. При цьому компоненти суміші подають із попередньо наповнених проміжних посудин регульованого об'єму із забезпеченням рівної температури

газів у проміжних посудинах протягом витікання. Розроблено й виготовлено генератор паливної суміші, який реалізує запропонований спосіб;

- спроектовано та виготовлено систему ініціації керованого згоряння, яка містить блок високоенергетичного іскрового запалювання з регульованою енергією іскрового розряду й спеціальні свічки запалювання, завдяки яким ефективно реалізуються режими прямої ініціації детонації паливної суміші;

- удосконалено конструкцію клапана керованого випускання продуктів згоряння з робочої камери термоімпульсної установки. На відміну від раніше використовуваної конструкції, запропоновано здійснювати попереднє подання тиску на відкриття клапана з його утриманням електромагнітом. Це дозволяє досягти необхідних показників як за швидкістю спрацьовування (на рівні 0,01 с), так і за його стабільністю. Окрім цього, на вимогу забезпечити потрібний час оброблення деталі, для узгодження роботи систем ініціації згоряння й керованого випускання клапан обладнано засобами контролю положення (енкодерами);

- уперше для калібрування числових моделей розроблено й виготовлено модульний автономний автоматичний реєстратор експериментальних даних, який не потребує з'єднання із зовнішньою вимірювальною апаратурою. Пристрій розміщується безпосередньо в камері термоімпульсного обладнання, має на собі необхідну кількість датчиків, а також енергонезалежну систему зчитування, перетворення та зберігання інформації. Апаратне й програмне забезпечення реєстратора в поєднанні з розробленими числовими моделями робочих процесів термоімпульсного оброблення є базою для повної автоматизації проектування процесів фінішного оброблення детонувальними газовими сумішами з гарантованим рівнем якості деталей;

- уперше щодо автоматизації технології термоімпульсного оброблення, зокрема для визначення відповідних налаштувань обладнання й прогнозування параметрів якості оброблення, розроблено методику побудови цифрових близнюків на основі комбінації моделей зниженого порядку (ROM) робочих процесів оброблення й одновимірних моделей для стандартних елементів газового тракту, яка дозволяє із забезпеченням високої точності отримуваних результатів суттєво скоротити час їхнього визначення за рахунок використання моделей процесів зниженого порядку й використання стандартних елементів бібліотек Twin Builder та Modelica, які імітують роботу елементів керування (клапанів) й моніторингу (сенсорів). Розроблені моделі, алгоритми й технічні рішення для систем термоімпульсного обладнання й системи ЧПК дозволяють забезпечити встановлені вимоги щодо точності генерації суміші, часу оброблення й стабільності цих параметрів за циклічної роботи.

4. Повнота викладення основних результатів дисертації в опублікованих роботах.

Представлені в роботі наукові та практичні результати пройшли широку апробацію на вітчизняних та міжнародних конференціях, за результатами яких опубліковано 17 матеріалів конференцій, із них 10 *проіндексовано в базі даних Scopus*.

Основні наукові та практичні результати дисертації повною мірою викладено у 21 статті, у наукових виданнях, включених до *Переліку наукових фахових видань України*, 1 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 9 статтях у наукових періодичних виданнях, включених до категорії «А» *Переліку наукових фахових видань України*, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних *Web of Science Core Collection* та/або *Scopus*, із них 4 статті Q1/Q2, 4 статті Q3, 1 стаття Q4; 6 монографіях (розділах монографій), із них 2 *проіндексовано в базі даних Scopus*; 2 патентах України на винахід і 4 патентах на корисну модель.

Таким чином, повноту публікацій змісту дисертації слід визнати вичерпною. Особистий внесок дисертанта в роботах, виконаних зі співавторами, точно відображений у дисертації та авторефераті.

5. Дискусійні положення та зауваження до дисертації

По дисертації також маються деякі дискусійні питання та зауваження

- 1) З тексту незрозуміло які і як саме обирала авторка початкові та граничні умови при моделюванні «іскрового розширення» (Скоріше за все, мова йде про розширення іскрового каналу), стор.126-129. Далі вона частково описує такі умови, однак вичерпного пояснення не надає;
- 2) Незрозумілою є також таблиці 2.2. стор.120, 2.3, стор.122, оскільки вони складаються з усього одного рядка;
- 3) В роботі не зазначено, за яких умов буде відповідність моделі, побудованої авторкою для розряду в нейтральному газі (в азоті) умовам розряду в робочому середовищі (водневому або метановому), п.2.2.3, сто.129-131.
- 4) Описуючи калібрування моделі ініціювання детонації, стор.142, авторка обмежено представила результати такої ідентифікації, не навівши відповідних числових значень, у тому числі, і параметра Парка s . Це було б бажано уточнити.
- 5) Ще одне питання також стосується завдання граничних і початкових умов для математичних моделей аналізованих процесів. Мова йде про рівняння роз поділу теплових потоків, зокрема (2.41), (2.42), стор.149. Граничні умови (2.42) потребують уточнення, оскільки вочевидь мають передбачати зовнішні та внутрішні поверхні. В подальшому авторка на основі даних

міркувань буде дослідження умов заповнення камери під час виконання оброблення (розділ 3).

- 6) В запропонованому рівнянні (2.47) стор.166 питомі теплові потоки визначаються співвідношенням площ камери, еквівалентної деталі та деталі реальної. Таке твердження потребує уточнення, оскільки незрозуміло, чи враховуються площі відповідно до рис. 2.25.
- 7) Для задачі п. 3.1.2. найрозрідженого балансного пакування (стор.188) бажано додати розрахункову схему, що дозволить уникнути питань при переході від постановки задачі у загальному вигляді до конкретних варіантів виконань. Потребує пояснень перехід від двовимірної постановки до просторової, тривимірної (як це зроблено на рис. 3.7).
- 8) Слід відзначити наявність у тексті деяких термінів, що не зовсім коректно передають зміст роботи. Наприклад, наводячи визначальні рівняння, стор.110, авторка пише про «тензор напруг», у той час коли мова йде про напруження; те саме можна зауважити і стосовно «напруг Рейнольдса», стор.112; за сутністю вочевидь мова йде про напруження. Чи має на увазі авторка відомий термін «цифрового двійника», коли мова йде про «цифрового близнюка», стор. 337?
- 9) Бажано уточнити яку зону авторка визначає як заборонену (стор.215-216) зону?
- 10) З розд.4 залишилося незрозумілим, чи врахована випадковість геометричних параметрів задирок та їх розташування на поверхні (тобто чи враховуються при призначенні режимів обробки чинники ймовірнісного характеру, оскільки на стор. 239 мова йде про детерміновані величини
- 11) Чи враховується наявність концентраторів напружень на поверхнях оброблюваних тіл, коли авторка пропонує визначати термічні напруження на основі аналізу запропонованих п'яти канонічних областей?
- 12) Яка точність процесів і явищ, відтворених цифровими близнюками газорозподільної системи (розд.5)?

Автореферат має окремі стилістичні помилки, які не впливають на сприйняття наданого матеріалу.

В цілому робота справляє позитивні враження, а зауваження мають частковий характер і сприяють поглибленню уявлень за її окремими аспектами

6. Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота Шипуль Ольги Володимирівни є завершеною науково-технічною працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувачки науковий напрям галузі знань 13 Механічна інженерія, якій відповідає спеціальність 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки.

Дисертація «Наукові основи прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами» за метою, характером вирішених завдань, а також за спрямованістю основних результатів, повною мірою відповідає паспорту спеціальності 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки, зокрема таким його напрямкам:

- математичне моделювання процесів фізико-технічної обробки матеріалів;
- теорія та системи автоматизованого проектування технологічних процесів фізико-технічної обробки та обладнання.

За актуальністю, ступенем новизни, науковою й практичною цінністю, достовірністю та апробацією отриманих результатів дисертаційна робота Шипуль Ольги Володимирівни відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені Порядком присудження наукових ступенів, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 до докторських дисертацій, а здобувачка Шипуль Ольга Володимирівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки.

Офіційний опонент:

професор кафедри конструювання машин
Національного технічного університету
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

доктор технічних наук, професор



Олександр САЛЕНКО

30 Вчений секретар

Національного технічного університету
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



Валерія ХОЛЯВКО

Гина Гірісвєвє