

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Іщенка Григорія Івановича

«Технологічне забезпечення якості виготовлення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування

### **Актуальність теми.**

Світовий попит та споживання енергії стрімко зростає, що вимагає інтенсифікації способів постачання енергії для задоволення потреб промислових виробництв. Підвищення потужності напряму пов'язано з підвищенням енергоефективності обладнання. При цьому мають бути витримані підвищені вимоги до їх виготовлення та експлуатації. Таким чином, підвищення енергоефективності парових турбін є надважливою проблемою для промисловості, пов'язаною з розв'язанням науково-прикладних проблем вдосконалення конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. Важливу роль у забезпеченні конкурентоспроможності парових турбін відіграє технічний рівень механообробного виробництва, зокрема досконалість технологічних процесів виготовлення турбінних лопаток. При цьому вимоги щодо забезпечення точності розмірів та якості оброблюваних поверхонь підвищуються, з огляду на інтенсифікацію режимів оброблення. Широке впровадження верстатів із ЧПК, що дозволяє реалізовувати багатокоординатне оброблення, надає нові технологічні можливості щодо удосконалення технології виготовлення і висуває нові вимоги до технологічного оснащення.

Виходячи з аналізу вищенаведених аргументів, вважаю, що дисертаційна робота Іщенка Г.І. «Технологічне забезпечення якості виготовлення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів» присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі забезпечення якості оброблення та зниження трудомісткості оброблення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток шляхом вдосконалення оздоблювальних операцій технологічного процесу, яка спрямована на підвищення ефективності виробництва, є сучасною та актуальною. Вищевикладене підтверджує, що тема дисертації Іщенка Г.І. відповідає вимогам за ознакою «актуальність обраної теми дисертації».

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, їх достовірності та новизни.**

Обґрунтованість результатів, одержаних у дисертаційній роботі Іщенка Г.І. забезпечена відповідністю основним науковим положенням технології машинобудування, теорії формоутворення та основ формування точності та якості поверхонь, 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 та експериментальних досліджень. 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 положень, висновків і рекомендацій підтверджено достатньо точним збігом їх з експериментальними даними, та апробацією отриманих результатів на конференціях, а також впровадженням розроблених рішень у виробництво. Не викликають сумнівів результати, отримані із застосуванням імітаційного моделювання та методики багатofакторного планування експерименту.

Мета дисертаційного дослідження щодо забезпечення якості та зниження трудомісткості оброблення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток із титанових сплавів при вдосконаленні шліфувальних і полірувальних операцій технологічного процесу досягнута достатньою мірою.

**Новизна наукових результатів, отриманих у роботі,** полягає у тому, що в дисертаційній роботі запропоновано та реалізовано науковий підхід щодо забезпечення якості та зниження трудомісткості оброблення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток, виготовлених із титанових сплавів, шляхом вдосконалення структури технологічного процесу та технологічного оснащення.

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

- отримав подальший розвиток науковий підхід до проектування технологічних процесів, що полягає у формуванні раціональної структури оздоблювальної стадії технологічного процесу, що забезпечило задані показники якості оброблюваних поверхонь;

- отримав подальший розвиток підхід до підвищення ефективності механічного оброблення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток, що реалізується шляхом впровадження прогресивних засобів технологічного та метрологічного забезпечення, що в сукупності сприяло скороченню трудомісткості виготовлення;

- отримав подальший розвиток методологічний підхід параметричної оптимізації процесу оброблення турбінних лопаток з титанового сплаву в частині мінімізації питомої собівартості оброблення, що забезпечило обґрунтований вибір оптимальних режимів різання при шліфуванні.

#### **Важливість результатів дисертаційної роботи для науки і практики.**

Усі теоретичні розробки, представлені в дисертації, доведені автором до конкретних практичних рішень у вигляді стендів, дослідних зразків, інженерних методик та впроваджені в промислове виробництво, що підтверджено відповідними актами.

Дана дисертаційна робота відповідає Енергетичній стратегії України до 2035 р. з продовження експлуатації діючих енергоблоків АЕС та виконувалась в рамках завдань, що вирішувалися АТ «Турбоатом» за інвестиційною програмою

технічного переозброєння до 2025 р. та програмі участі у модернізації обладнання АЕС України на 5-річний період (2020–2024 р.р.) з ДП НАЕК «Енергоатом».

#### **Рекомендації щодо використання результатів дисертації.**

Результати роботи можуть бути використані для високопродуктивного оброблення турбінних лопаток із титанових сплавів. Автором запропонована нова конструкція високоструктурного абразивного інструменту, захищена Патентом України, та експериментально встановлені рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання для операцій шліфування титанових сплавів без використання мастильно-охолоджуючих засобів. Запропонована нова конструктивна схема пристрою для полірування складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток безкопінним способом, що забезпечує досягнення заданої якості оброблюваної поверхні. Вдосконалена технологія складання турбінних лопаток завдяки запропонованому спеціальному пристрою (технологічний диск), що забезпечує скорочення витрат часу при монтажі лопаток. Основні результати роботи впроваджено у виробництво на АТ «Турбоатом» (м. Харків).

#### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані в 17 наукових працях, у тому числі 11 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у виданні, що індексується наукометричною базою даних Scopus, 1 стаття у закордонному періодичному виданні, 1 патент України на корисну модель, 3 – у матеріалах науково-технічних конференцій.

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 Іщенко Г.І. вимогам за ознакою «повнота опублікованих результатів».

#### **Оцінка змісту дисертаційної роботи.**

Структура дисертаційної роботи є логічною, вона оформлена згідно встановлених вимог та відповідає загальноприйнятим нормам для наукових досліджень. Матеріали дисертації викладено у 5 розділах загальним обсягом 184 сторінки, які, крім текстового наповнення, включають 75 рисунків, 17 таблиць, 2 додатків на 10 сторінках, список використаних джерел з 120 найменувань. Загалом, обсяг дисертації відповідає вимогам щодо рекомендованого обсягу кандидатської дисертації.

Дисертаційна робота написана у науковому стилі. Застосована в роботі наукова термінологія є загальноновизнаною, результати теоретичних і практичних досліджень, нові наукові положення, висновки і рекомендації доступні для сприйняття та використання.

Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи, написаний 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».

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми та доцільність дослідження, визначено мету і завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, сформульовано наукову новизну і практичну значимість роботи.

*У першому розділі* на базі аналізу літературних джерел позначені головні проблеми сучасного турбінобудування. Основна увага приділена сучасній тенденції забезпечення конкурентоспроможності та імпортозаміщення в енергетичному машинобудуванні. У роботі наведені статистичні дані щодо розподілу турбін для АЕС світових конкуруючих лідерів атомного енергомашинобудування, де АТ «Турбоатом» займає одну з лідируючих позицій і розглянуто його технологічні можливості для виготовлення обладнання. Детально проаналізовано лопатковий апарат парових і газових турбін, зокрема приділено увагу службовому призначенню та умовам експлуатації турбін, конструктивним особливостям лопаток, матеріалам для їх виготовлення, а також основним вимогам щодо їх механічного оброблення. Здійснено ґрунтовний аналіз технологічності турбінних лопаток та їх класифікацію за конструкторськими ознаками як попередній етап для вдосконалення технології виробництва. Даний розділ роботи дозволив визначити вірний вектор досліджень, який полягає у вдосконаленні технологічної підготовки виробництва. Представлений аналітичний огляд наукових досліджень, який можна вважати достатньо вичерпним, дозволив сформулювати в цілому вірну мету дисертаційної роботи і сформулювати задачі подальших досліджень.

*У другому розділі* основна увага приділена методам забезпечення якості та продуктивності оброблення турбінних лопаток із важкооброблюваних матеріалів. Тут, вивчаючи технологічні особливості механічного оброблення складнопрофільних поверхонь лопаток, автор аналізує типовий технологічний процес виготовлення деталей даного типу і базовий технологічний процес, реалізований на АТ «Турбоатом». Автор наголошує на існуючих недоліках методів контролю складнопрофільних поверхонь лопаток зазначених вище технологічних процесів, та вказує на перспективи і можливості інтенсифікації механічного оброблення. Наступним логічним кроком дослідження стало впровадження сучасних методів і засобів для оснащення контрольних операцій, що дозволило забезпечити якість виготовлення деталей і скоротити витрати часу на контрольні процедури. Таким чином, другий розділ дисертації заклав підґрунтя для подальших досліджень і окреслив їх межі.

*Третій розділ* присвячений вирішенню важливої в межах даної дисертації задачі формування раціональної структури технологічного процесу оброблення

складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток. Автором запропоновано турбінні лопатки виготовляти з титанового сплаву, що вимагає проектування нового технологічного процесу. Особливу увагу даного розділу приділено вимогам щодо забезпечення точності та якості оброблюваних поверхонь. Розроблено структуру маршрутного технологічного процесу, призначено металообробне обладнання та технологічне оснащення, здійснено нормування операцій. Виконання найбільш відповідальних операцій наочно проілюстровано. Автором запропоновано оригінальну конструкцію обладнання для полірування профілю робочих поверхонь турбінних лопаток, особливістю якого є безкопінний спосіб. Такий підхід значно зменшує витрати на технологічну підготовку виробництва. Детальний опис конструкції, принцип роботи, математичний опис та розрахунки режимних параметрів свідчать про обґрунтованість даного технічного рішення, яке може бути механізованим або автоматизованим. Загалом даний розділ дає позитивні результати щодо підтвердження отриманих наукових результатів.

*У четвертому розділі* наведені результати оптимізаційної задачі вибору оптимальних параметрів режиму різання при шліфуванні титанового сплаву на основі методики багатофакторного планування експерименту. Автором висунуто твердження, що комплексним критерієм є питома собівартість оброблення, який і обрано за критерій оптимальності. Обмеженнями визначено шорсткість обробленої поверхні та контактну температуру різання. Інтервали варіювання обиралися в діапазоні умов процесу шліфування, що забезпечують найменшу питому собівартість оброблення і найкращі показники обробленої поверхні. Продуктивність і відносна витрата шліфувального круга розраховувалися за аналітичними залежностями. Шорсткість поверхні та контактна температура досліджувалися як параметри якісного оброблення поверхонь.

У дисертаційній роботі приведено опис експериментальної установки, детально зазначені параметри дослідних зразків, інструментів та пристроїв, що використовувалися при експериментальних дослідженнях. Варто відзначити сучасне вимірювальне обладнання, зокрема растровий двопроменевий мікроскоп Versa 3D Lovac, профілометр SURTRONIC 3+, універсальна вимірювальна станція HOMMELWERKE T8000, що свідчить про ґрунтовний підхід до визначення параметрів якості оброблюваних поверхонь.

На основі отриманих рівнянь регресії побудовані тривимірні поверхні відгуку, що дозволяють обирати оптимальні режимні параметри процесу шліфування з метою забезпечення заданих показників продуктивності оброблення, відносної витрати шліфувального круга і питомої собівартості оброблення. Крім того, результати досліджень підтвердили, що характеристика шліфувальних кругів істотно впливає на шорсткість та контактну температуру. У роботі у достатній мірі наведені профілограми та ілюстрації поверхні зразків, отримані за допомогою електронної мікроскопії. Отримані результати підтверджують ідею автора, що для високопродуктивного шліфування необхідно застосовувати високоструктурний абразивний інструмент без

використання мастильно-охолоджуючих засобів.

Таким чином, опис результатів виконання оптимізації та експериментальних досліджень механічного оброблення деталей із титанового сплаву та оцінювання їх якості оброблення дозволив підтвердити, що забезпечення якості оброблених поверхонь виконане.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи методами імітаційного моделювання виконано порівняння роботи виробничої дільниці з виготовлення турбінних лопаток при реалізації базового та запропонованого технологічних процесів за критерієм трудомісткості виготовлення. При цьому враховуються дані про послідовність операцій і їх нормування, наявність обладнання та технологічного оснащення, партії запуску, транспортний шлях переміщення деталей при виготовленні. Аналіз результатів імітаційного моделювання підтвердив, що запропонована структура технологічного процесу виготовлення турбінних лопаток із титанових сплавів забезпечує ефективність виробництва, при цьому трудомісткість виготовлення знижена на 30% порівняно з базовим технологічним процесом.

Важливою завершальною частиною роботи стало розроблення практичних рекомендацій щодо модернізації обладнання та впровадження багатокоординатного оброблення, для забезпечення точності та якості оброблених поверхонь, зниження трудомісткості виготовлення, а також скорочення одиниць технологічного оснащення (копірів), що позитивно впливає на ефективність виробництва лопаток парових турбін.

Таким чином, наведені результати досліджень підтверджують наукові положення та практичне значення отриманих результатів для промисловості.

*Висновки до розділів та за результатами роботи* здебільшого сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

*Список використаних джерел* достатньо повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації із 112 найменувань.

*Додатки* включають опис Патенту України на корисну модель, акти впровадження результатів досліджень у виробництво.

### **Зауваження до дисертації.**

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

1. У розділі 1 приведений ґрунтовний огляд вітчизняного турбінобудування, при цьому закордонний досвід, зокрема досвід всесвітньовідомих компаній Westinghouse Electric Corporation (США), General Electric (США), Siemens Energy (Німеччина), Mitsubishi Power (Японія), Doosan Skoda Power (Чеська республіка) та інших, зазначений не в повній мірі.

2. Бажаним було б у розділі 3 представити порівняльний аналіз базового та запропонованого технологічних процесів, зокрема акцентувавши відмінності за технологічними показниками. Це дозволило б оцінити кількісні переваги запропонованого технологічного процесу.

3. На мій погляд, більшість інформації п. 3.2 містить оглядовий (аналітичний) характер, тому було б доцільно розмістити у розділі 2.

4. Із тексту дисертаційної роботи не зрозуміло, чи реалізована запропонована схема безкопірного полірування криволінійних поверхонь лопаток (рис. 3.9, с. 106) у запропонованому технологічному процесі.

5. Висновок 1 до розділу 3 (с. 114) та частина загальних висновків 6 (с. 163) щодо впровадження нового верстатного пристрою (технологічного диску), що забезпечує скорочення витрат часу на монтаж ряду лопаток на станції з двох тижнів до двох діб виглядає декларативним, оскільки у роботі не представлено ані схему (ескіз) технологічного диску, ані опису процесу складання. Із розрахунків (табл. 5.1) не зрозуміло завдяки чому відбувається значне скорочення витрат часу.

6. У розділі 4 бажаним було б навести схему експериментальної установки, що дозволило б зняти питання щодо встановлення динамометру та прояснити як відбувається процес фактичного вимірювання середньої контактної температури та сили притискання.

7. У висновку 9 розділу 4 (с. 146) «Рекомендовано застосовувати для високопродуктивного шліфування титанових сплавів без використання мастильно-охолоджуючих засобів високоструктурний абразивний інструмент на керамічних зв'язках, на який отримано патент України № 128773 (див. Додаток А)» варто було б у тексті деталізувати операцію технологічного процесу, де використовується запропонований інструмент та пояснити за рахунок чого відбувається перевага запропонованого рішення, а також зазначити режими оброблення.

8. У розділі 4 дисертаційної роботи наведено залежність собівартості шліфування (ф-ла 4.5, с. 121) від економічних показників, однак у роботі не наведено модель, що визначає залежність між продуктивністю оброблення, відносною витратою шліфувального круга, питомою собівартістю оброблення, шорсткістю обробленої поверхні, контактною температурою різання.

9. У дисертаційній роботі наявні граматичні помилки, описки, якість представлення деякого ілюстративного матеріалу є низькою (рис. 2.2, с. 54; рис. 2.3, с. 55; рис. 3.2, с. 77). Крім того, деякі дані містять позначення російською мовою (табл. 1.4, с. 42; табл. 1.5, с. 43; табл. 2.1, с. 51-53; табл. 2.2, с. 58-59; рис. 2.1, с. 50; рис. 3.7, с. 102; рис. 3.8, с. 103; рис. 4.3-4.14, с. 129-134, рис. 4.15-4.20, с. 138-140).

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

