

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію Векілова Саміра Шамсійовича

«Підвищення гідравлічних характеристик трактів рідинних ракетних двигунів,
виготовлених із застосуванням адитивних технологій»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

1. Актуальність теми дисертації

В сучасній тенденції до глобальної комерціалізації космічної індустрії впровадження адитивних технологій представляє значний інтерес. Перспективне скорочення виробничого циклу за рахунок відмови від використання великої кількості оснащення, обов'язкового при традиційному – «класичному» виробництві, практично є синонімом підвищенню технологічної ефективності підприємства. При подальшому розгляді процесу, як взаємодії конструкторського та виробничих департаментів, можна зробити висновок, що зріст ефективності також відбивається і на проектуванні конструкції.

В роботі розглянуто застосування адитивної технології Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), як основи для виготовлення основних елементів гідравлічних трактів РРД складної конфігурації. Автором визначений вплив особливостей технології на відповідні характеристики елементів рідинних ракетних двигунів (РРД), а також сформовано рекомендації, щодо подальшого застосування в умовах новітнього космічного виробництва. Беручи до уваги очевидні переваги, що набувають розвитку під час впровадження технології L-PBF до виробничого циклу РРД, актуальність роботи не викликає сумнівів.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота тісно пов'язана з виконанням держбюджетної теми «Створення і удосконалення технологій і матеріалів для ракетних засобів ураження на основі інноваційних конструкторсько-технологічних рішень», № 6-675-23, № держреєстрації 0123U101855, в якій дисертант приймав участь. Отримані

результати відповідають вимогам Закону України «Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні». Наукова новизна та практичне значення підтверджені Актами реалізації, засвідченими відповідальними особами ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ» та ТОВ «Дніпро Аероспейс».

3. Наукова новизна отриманих результатів

В дослідженні проаналізовано залежність гідравлічних характеристик відцентрових форсунок залежно від комплексу геометричних параметрів, що формує **основну наукову новизну** отриманих результатів дисертаційного дослідження. Доведено, що відомі залежності інших авторів не підходять для прогнозування цього параметра на ранніх етапах проектування. Автор дисертації вперше запропонував формулу, що описує залежність коефіцієнта витрати від комплексу геометричних параметрів для відцентрових форсунок, виготовлених за допомогою адитивної технології. З огляду на великий обсяг технологічних та гідродинамічних процесів, запропонований експериментальний підхід до емпіричної формалізації є виправданим.

Отримані дані про характеристики шорсткості поверхонь виробів, створених за допомогою адитивних технологій, вже висвітлені в багатьох працях інших авторів і мають переважно практичний інтерес як набір статистичних значень. Проте, у даному дисертаційному дослідженні вперше запропоновано розглядати зміну шорсткості поверхонь 3D-друку гармонічними функціями. При цьому, такі функціональні залежності побудовані для випадків «вгору» та «вниз» орієнтованих поверхонь. Такий підхід дозволяє використовувати отримані формули для раннього прогнозування параметрів, що знаходяться в безпосередній залежності від шорсткості поверхонь (наприклад, гідравлічного опору тракту охолодження і т. п.). Отримані в дисертаційному дослідженні результати також **представляють наукову новизну**.

4. Практичне значення отриманих результатів

Основне значення для практики за результатами дисертаційного дослідження, на мою думку, є запропонована методика проєктування

відцентрових форсунок, що поєднує в собі запропоновану залежність зміни гідравлічних характеристик змішувальних елементів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій та послідовність дій для отримання бажаних значень.

Також в роботі автором приведені рекомендації щодо перевіреного діапазону зміни геометричних параметрів складних елементів РРД (наприклад, поясів завісного охолодження, жиклерів, зразків трактів регенеративного охолодження РРД і т. п.), що без сумніву представляє практичне значення.

Підтвердження вірності рекомендацій описане у розділі 4, в якому автор застосовує приведені рекомендації при проектуванні та подальших вогневих випробуваннях дослідних конструкцій камер РРД. Отримані результати підтверджують роботоздатність рекомендованих автором діапазонів застосованості параметрів, а також можливість отримання вискоефективних конструкцій, застосовуючи новітні технології. Таким чином, приведені в дисертаційному дослідженні результати представляють значний практичний інтерес.

Наукові положення, висновки і практичні рекомендації дисертанта Векілова Саміра Шамсійовича, на мою думку, обґрунтовані достатньою мірою.

5. Аналіз змісту дисертації

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічних завдань у сфері 3D-друку та адитивного виробництва. У ній проведено огляд сучасного стану 3D-друку, включаючи класифікацію категорій адитивного виробництва, їх переваги та недоліки. Зазначено, що нові технології не завжди швидко стандартизуються, але для комерціалізованих типів, таких як Powder Bed Fusion та Directed Energy Deposition, можливе використання існуючих стандартів. Аналізуються конструктивні особливості рідинних ракетних двигунів, зокрема пояси завісного охолодження, з пропозицією використання L-PBF.

Досліджено шорсткість поверхонь виробів, виготовлених за допомогою технології L-PBF. Проведено металографічний аналіз тестових зразків і реальних виробів, а також порівняння адитивного та класичного виробництва на прикладі

відцентрової форсунки. Результати підтверджують доцільність адитивної технології та необхідність подальших досліджень.

Експериментально вивчено властивості зразків, зокрема гідравлічні характеристики жиклерів і тангенціальних отворів. Розроблено та досліджено конструкції поясів завісного охолодження та елементи трактів регенеративного охолодження рідинних ракетних двигунів. Підтверджено можливість виготовлення комплексних частин без паяння та зварювання, а також вплив шорсткості поверхонь на гідравлічний опір.

Дослідження систем сумішоутворення, виготовлених за допомогою L-PBF, показують, що змішувальні головки, створені за допомогою адитивної технології, перевищують ефективність класичних аналогів.

Аналіз експериментальних даних щодо шорсткості поверхонь і гідравлічних характеристик відцентрових форсунок підтверджує високу якість виробів, виготовлених адитивними технологіями.

Дисертаційна робота Векілова Саміра Шамсійовича «Підвищення гідравлічних характеристик трактів рідинних ракетних двигунів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій» повністю відповідає спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

6. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірності

Результати дисертаційного дослідження ґрунтуються на експериментальному визначенні характеристик виготовлених виробів. Використане обладнання є повністю сертифікованим і пройшло верифікацію, що гарантує достовірність отриманих даних.

Перед початком експериментів автор провів ретельний аналіз існуючої літератури з теми дослідження. Під час подальших досліджень дисертант методично і послідовно аналізував експериментальні результати та вивчав вплив змін конструктивних параметрів на характеристики виробів. Отримані висновки чітко сформульовані на основі отриманих даних і повністю відповідають змісту дисертаційного дослідження.

7. Оцінка академічної доброчесності дисертаційного дослідження

Детальне ознайомлення з текстом дисертаційного дослідження, а також його перевірка за допомогою академічної системи Strike Plagiarism дають підстави констатувати, що робота Векілова Саміра Шамсійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

8. Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота здобувача написана грамотною українською мовою, має змістовну цілісність, послідовність та довершеність. Стиль виконання відповідає вимогам наукової літератури, робота виконана з використанням загальноприйнятої термінології.

Дисертаційну роботу оформлено відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

9. Публікація та апробація основних результатів дисертації

Наукові результати дисертації викладені у 12 наукових публікаціях автора. Серед них 7 статей у наукових виданнях, що на момент публікації були включені до переліку наукових фахових видань України. Всі опубліковані матеріали пройшли кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосуються наукових результатів дисертації. Крім того, результати дисертації були представлені на 5 міжнародних наукових фахових конференціях.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю відображені у наукових публікаціях автора.

10. Зауваження до дисертаційної роботи

1. В роботі автор приводить досить розвинену класифікацію сучасних категорій процесів адитивного виробництва, звертаючи увагу, що галузь зберігає тенденцію до розвитку та появу нових методів. І хоча за текстом дисертації логічно обгрунтовано вибір категорії процесу, але описані переваги та недоліки мають здебільшого загальний характер, що не в повній мірі передає характеристику технології. На мій погляд, було б доречно більш детально звернути увагу на особливості та технологічні обмеження, що виникають під час застосування обраної категорії виробництва (наприклад, тепловіддачі в процесі виробництва, розмірності виробничого устаткування, та ін.).

2. В роботі проведена оцінка гідравлічних характеристик отримуваних виробів, однак не було проаналізовано відхилення (чи його наявність) геометричних розмірів реальної деталі від закладених в 3D моделі.

3. В роботі присутні незначні граматичні та змістові помилки за текстом дисертаційної роботи.

Загалом, я вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

11. Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційну роботу здобувача ступеня доктора філософії Векілова Саміра Шамсійовича на тему «Підвищення гідравлічних характеристик трактів рідинних ракетних двигунів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій» виконано на високому науковому рівні, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про

присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач **Векілов Самір Шамсійович** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Офіційний рецензент:

Кандидат технічних наук, доцент
доцент кафедри ракетно-космічних і
інноваційних технологій
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара



Олена **КАРПОВИЧ**

Підпис доцента Олени КАРПОВИЧ
засвідчую:

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара,
кандидат біологічних наук, доцент



Олег **МАРЕНКОВ**

_____ 2024 року