

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Бондаренка Олега Євгенійовича  
на тему «Удосконалення масової ефективності силових елементів  
ракетних двигунів», представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 13 Механічна інженерія  
за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

### Актуальність теми дисертації

Розвиток адитивних технологій, як 3Д-друк і виготовлення елементів конструкцій з композиційних матеріалів позитивно впливають на ракетно-космічну галузь в цілому, тому більшість космічних компаній (державних та приватних) все більше використовують 3Д-друковані вироби та деталі з композиційних матеріалів. 3Д-друк значно прискорює час виготовлення тих чи інших виробів, що вкрай необхідно для забезпечення конкурентоспроможності конструкції на світових ринках ракетно-космічної техніки. Також з розвитком адитивних технологій відкрились більші можливості для створення нетипових геометричних форм тих чи інших деталей. Проте саме ці можливості для силових елементів конструкцій ракетно-космічної техніки потребують вирішення ряду оптимізаційних задач, спрямованих на забезпечення мінімальності маси конструкції при задоволенні експлуатаційних вимог, в яких міцність і жорсткість конструкції є головними. В роботі говориться про принцип топологічної оптимізації, як один із сучасних і ефективних методів забезпечення міцності і жорсткості конструкції при її мінімальній масі, і навіть наведена схема алгоритму при виконанні топологічної оптимізації у випадку 3Д-друк. Описано сам процес топологічної оптимізації у виконанні автора, проведено аналіз міцності кронштейну кріплення, визначений кінцевий варіант його друкованої конструкції і наведено результат виготовлення. Також у роботі є результати проведених автором чисельного оптимізаційного процесу зменшення маси силової рами двигуна розгінного блоку і приклади розрахунків

автором параметрів намотування композитної силової оболонки і розрахунків її міцності в залежності від кута армування.

Враховуючи, що представлені в роботі матеріали відповідають напрямку удосконалення масової ефективності елементів конструкції ракетно-космічної техніки, тематика рецензованої роботи є надзвичайно актуальною і затребуваною.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеності та дотримання принципів академічної доброчесності**

Структура дисертаційної роботи складається з вступу, анотацій українською та англійською мовами, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації 118 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету і основні задачі дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, описано методи, які були використані у дослідженнях і особистий внесок здобувача.

У першому розділі наведено перелік силових елементів конструкцій, обраних автором для досліджень (балони високого тиску, кронштейни кріплення, силові рами, силовий композитний корпус ракетного двигуна на твердому паливі), розглянуті загальні особливості їх роботи і застосовувані матеріали, особливості застосування до цих конструкцій методу топологічної оптимізації. Також в цьому розділі наведене поняття про експлуатаційні характеристики силових елементів. Висновками розділу означені наступні задачі:

- розробити універсальну алгоритм для розрахунку силових елементів;
- обґрунтувати ефективність цього алгоритму;
- провести чисельне моделювання задач у САЕ середовищі,

які необхідно виконати у ході даної роботи, та думки автора щодо важливості удосконалення масової ефективності силових елементів, як ключового завдання



для підвищення загальної ефективності ракетних систем, і ролі топологічної оптимізації в цих процесах.

У другому розділі перераховано існуючі, на думку автора, технологічні й інженерні методи вирішення задачі підвищення експлуатаційних характеристик силових елементів, надано стислий опис кожному методу, а також розглянуто можливості та технології для виготовлення представлених в першому розділі силових елементів конструкцій. Конкретизовані методи топологічної оптимізації, наведено вигляд цільових функцій, наведено ілюстрацію прикладу роботи топологічної оптимізації кронштейна. Також згадано методику для розрахунку композитного корпусу ракетного двигуна на твердому паливі в програмі COCOON, призначеної для визначення оптимального кута армування для композитних конструкцій, а також розрахунку маси і об'єму оболонок і днища цих конструкцій. У висновках автором підкреслюється, що об'єднання інженерного і системного підходів з топологічною оптимізацією конструкції та експериментом буде отримано комплексний підхід до вирішення задач з підвищення експлуатаційних характеристик.

Третій розділ присвячено напрямкам вирішення задачі підвищення експлуатаційних характеристик за допомогою CAE систем. Наведено короткий опис і схематичне зображення алгоритму топологічної оптимізації конструкцій. Подано загальний опис методу скінчених елементів та поняття про нього, про принципи, показані основні типи скінчених елементів для формування скінчено-елементних сіток і їх використання для різних задач. Подані відомості про закон Гука і та узагальнений закон Гука для моделювання, поняття про пластичність матеріалів та моделі зміцнення матеріалів. Акцентована важливість коректного задання граничних умов та навантажень для топологічної оптимізації. У висновках до розділу пояснена важливість застосування Computer aided engineering систем для вирішення задач підвищення експлуатаційних характеристик, підкреслена новизна запропонованого алгоритму постановки та рішення задачі з підвищення експлуатаційних характеристик, наведені думки автора про те, що загальність та ефективність вирішення задачі підвищення експлуатаційних характеристик



через САЕ системи (метод скінчених елементів та закон Гука, узагальнений закон Гука) стає зрозумілою, коли ці елементи комбінуються для створення точних та достовірних моделей, що відображають поведінку матеріалів та конструкцій в різних умовах експлуатації.

Четвертий розділ присвячено практичній реалізації результатів дослідження. Приведений верифікаційний розрахунок балона високого тиску, виготовленого за допомогою 3D-друку, на тримкість. Також продемонстровано приклад топологічно оптимізованого кронштейну кріплення двигуна, який був виготовлений та успішно пройшов статичні вогневі випробування у складі двигунної установки. Проведено топологічну оптимізацію силової рами розгінного блоку двигуна, яка за чисельним моделюванням має достатній запас по міцності. Представлено результати чисельного моделювання композитного корпусу ракетного двигуна на твердому паливі. Наведено рекомендації, які застосовуються при проектуванні і виготовленні силових оболонкових конструкцій з полімерних композиційних матеріалів. Також для топологічно оптимізованої силової рами розгінного блоку двигуна подані приклади концентраторів напружень і пояснена важливість їх урахування і вплив на експлуатаційні характеристики. У висновках до розділу підкреслена важливість викладених у розділі матеріалів.

У висновках за результатами виконання дисертаційної роботи автором подана наукова новизна та практична цінність проведених досліджень. Нажаль, відсутнє вирішення задач, наведених у першому розділі.

Перелік використаних джерел свідчить про те, що під час роботи автор ознайомився з сучасними результатами наукових досліджень і частково використовував їх при написанні роботи.

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни**

Достовірність отриманих результатів ґрунтується:

- на випробуваннях двох з обраних для досліджень силових елементів на

міцність, на режимах, наближених до експлуатаційних;

- публікацією статей у фахових виданнях України;

- апробацією отриманих результатів на 3 міжнародних науково-практичних конференціях;

- актом впровадження в приватній космічній компанії FlightControl Propulsion.

### **Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна**

Результати наукового дослідження та висновки дисертації пройшли апробацію під час представлення на міжнародних конференціях та знайшли відображення в публікаціях у фахових виданнях. Наукові результати дисертації висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 6 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України. Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях.

Автором дисертаційної роботи на захист виносяться наступні наукові результати:

Вперше виконано оптимізацію геометрії кронштейнів кріплення та силових рам для реальних конструкцій РРД малої тяги розгінного блоку, які успішно пройшли серію вогневих випробувань у складі двигуна. Доведено, що граничні умови, встановлені при топологічній оптимізації конструкцій елементів, залежать від типу навантаження та особливостей зони прикладання навантаження. Подальшого розвитку набули закономірності впливу зон концентрації напружень на експлуатаційні характеристики деталей, виготовлених методом 3D-друку, що дозволяє розширити області застосування адитивної технології.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Практична цінність результатів роботи на думку автора полягає у тому,



що в ній отримано теоретичне і практичне підтвердження отриманих результатів, щодо запропонованого алгоритму. Практичне значення полягає в наступному:

- розроблена, експериментально та практично підтверджена нова методика топологічної оптимізації у вигляді структурованого алгоритму, за якою можна забезпечити удосконалення масової ефективності силових елементів конструкції двигунних установок ще на етапі проектування для подальшого виготовлення адитивними методами. Вперше одержані конструктивні елементи, які підтверджують цієї методики на виробництві;

- виконані дослідження можливості топологічної оптимізації елементів конструкції двигунних установок, виготовлених із композиційних матеріалів, на основі яких вперше запропонована методика для підвищення масової досконалості композитних конструкцій, ефективність якої підтверджена під час чисельного моделювання ракетного двигуна на твердому паливі.

- запропонований новий підхід до інтеграції чисельного моделювання у середовищі CAE Discovery Live в процеси технологічної підготовки виробництва елементів конструкцій двигунних установок із застосуванням адитивних технологій, який вперше впроваджений та реалізований на виробничій базі FlightControl Propulsion

### **Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності**

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні, про що свідчить висновок перевірки на плагіат за допомогою спеціалізованої сервісної програми Unicheck.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Бондаренка Олега Євгенійовича 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.

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, опублікованих у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України.

Також результати дисертації були апробовані на 3-х науково-практичних фахових конференціях.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота Бондаренка Олега Євгенійовича написана українською мовою, має змістовну цілісність і послідовність.

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

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

Слід вказати на такі основні недоліки роботи.

1. Невідповідність змісту розділу «Аналіз існуючих методів підвищення експлуатаційних характеристик конструкцій силових елементів» його назві — ні методи підвищення, ні їх аналіз на розглядаються. В розділах 1 (п. 1.2), 2 (п.п. 2.1.1, 2.1.2), 3 (п. 3.2) великі обсяги відомого суто інформаційного матеріалу без аналізу або висновків щодо можливостей застосування у дослідженнях.

2. В роботі не сказано про її зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами досліджень, або іншими причинами, що спонукали автора займатись даними дослідженнями, з огляду на їх специфіку.

3. Відсутність в роботі аналізу сучасного стану і рівня розвитку



методології і технологій підвищення масової ефективності елементів конструкцій, особливо шляхом топологічної оптимізації, відсутність огляду існуючих наукових праць і здобутків у цьому питанні значно ускладнює оцінку наукової новизни і практичної цінності результатів роботи.

4. Автор в різних розділах роботи подає загальні відомості про застосовувані матеріали, методики або технології без конкретизації стандартів, версій програмного забезпечення, марки обладнання тощо. Наприклад, вказується «середовище Ansys», «3D-друку технологією SLM», «Схема намотувального композитного станку», «Конструкція композитної конструкції РДТП», «був виготовлений класичними методами, стор. 5, 38, 104» та інше, і не оговорюється на яких умовах і яким чином автор мав доступ до цих конструкцій, програмного забезпечення, технології і обладнання.

5. Стосовно «Верифікаційний розрахунок на тримкість балону високого тиску, виготовленого адитивними технологіями», з рис. 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4 не зрозуміло, чому зона в червоному квадраті (рис. 4.1.4) вказує на місце руйнування, де на рис. 4.1.3 прогнозоване місце руйнування, якщо результати розрахунку на рис. 4.1.2 показують за кольором, що в цьому місці найменші поля пластичних деформацій.

6. Важко судити про коректність висновку на стор. 104, таблиця 4.4.8, коли невідомо, якими класичними методами і з яких матеріалів виготовлялась силова конструкція твердопаливного двигуна для порівняння з композитною.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними та не впливають на оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційну роботу здобувача ступеня доктора філософії Бондаренка Олега Євгенійовича на тему «Удосконалення масової ефективності силових елементів ракетних двигунів» виконано на 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 2022р. №44.

Здобувач Бондаренко Олег Євгенійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

**Офіційний рецензент:**

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



**Олексій КУЛИК**

Підпис доцента Олексія КУЛИКА  
засвідчую:

**Проректор з наукової роботи**

Дніпровського національного  
університету імені Олеся Гончара,  
кандидат біологічних наук, доцент



**Олег МАРЕНКОВ**