

УДК 629.7.03:621.438

doi:10.32620/aktt.2026.3.06

Д. О. КУЦ^{1,2}, В. С. ЄФАНОВ^{1,3}, О. В. ОМЕЛЬЧЕНКО⁴, О. О. КАЛІНІЧЕНКО¹,
О. В. ОВЧИННИКОВ^{1,3}, Р. Б. ОСІПЧУК¹

¹Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

²АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна

³Навчально-науковий інститут «Титан»

⁴Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ МЕТОДУ ВИГОТОВЛЕННЯ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ, НАДІЙНІСТЬ І РЕСУРС ЗАВИХРЮВАЧА КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ АВІАЦІЙНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Предметом вивчення в статті є витратні характеристики завихрювача камери згоряння авіаційного газотурбінного двигуна, надійність і ресурс вузла. **Метою** є встановлення впливу методу виготовлення на нерівномірність витрати повітря по контурах та визначення ролі цього фактора у формуванні надійності й ресурсу завихрювача в умовах реального термозодинамічного навантаження. **Завдання:** виконати порівняльний аналіз литого та адитивно виготовленого завихрювачів; оцінити вплив методу виготовлення на геометричну точність, шорсткість і нерівномірність витрати повітря; встановити зв'язок між нерівномірністю витрати повітря, характером температурного поля та ресурсними ризиками вузла; обґрунтувати доцільність переходу до адитивно виготовленої монодеталі. Використаними **методами** є 3D-сканування, профілометричний контроль шорсткості, продувка повітряного та паливоповітряного контурів, CFD-аналіз і зіставлення з виробничими даними. Отримано такі **результати**. Для адитивно виготовлених завихрювачів шорсткість внутрішніх порожнин становить Ra від 1,5 мкм до 3,9 мкм проти Ra від 3,3 мкм до 7,9 мкм у литих, а точність відтворення геометрії зростає вдвічі. За результатами продувок коефіцієнт нерівномірності витрати повітря зменшується з 12,1 % до 4,9 % у повітряному контурі, з 11,6 % до 4,1 % у паливоповітряному та з 3,90 % до 2,29 при сумісній оцінці двох контурів одночасно. Для литої партії відбракування становило 10 %, що підтверджує нижчу повторюваність витратних характеристик у разі застосування традиційної технології виготовлення. Показано, що підвищення геометричної відтворюваності та зниження шорсткості проточних каналів забезпечують менший розкид гідравлічного опору й більш стабільний розподіл повітря по контурах. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: встановлено, що метод виготовлення завихрювача безпосередньо впливає на нерівномірність витрати повітря, а через неї – на температурне поле, надійність і ресурс завихрювача; показано, що краща геометрична відтворюваність і нижча шорсткість внутрішніх поверхонь зменшують імовірність формування локальних перегрівів, які є визначальним фактором зниження ресурсу деталей гарячої частини двигуна. Отримані результати мають практичне значення для комплектування завихрювачів, прогнозування ресурсних ризиків і вдосконалення технологічних процесів виготовлення відповідальних елементів камер згоряння авіаційних газотурбінних двигунів.

Ключові слова: завихрювач, камера згоряння; авіаційний газотурбінний двигун; L-PBF; нерівномірність витрати повітря; надійність; ресурс.

1 Вступ

1.1 Мотивація

Завихрювач камери згоряння авіаційного газотурбінного двигуна є однією з найважливіших деталей, що визначає інтенсивність сумішоутворення, стабільність факела горіння, структуру зони рециркуляції, зон зворотних струмів і рівень нерівномірності температурного поля на виході з камери згоряння, що знижує довговічність турбіни. Для завихрювача

метод виготовлення має не лише технологічне, а й безпосереднє експлуатаційне значення, оскільки саме через точність відтворення геометрії поверхонь внутрішніх каналів, стан їх поверхні безпосередньо впливає на відтворюваність витратних характеристик, які формують і визначають тепловий стан деталей жарової труби, соплових апаратів і суміжних деталей гарячої частини двигуна [1-3].

Завихрювачі, що складаються з кількох деталей, виготовлених за традиційною ливарною техноло-



гією, накопичують ряд технологічних похибок у вигляді геометричних відхилень, варіацій ефективних прохідних перерізів каналів і локальних дефектів. Такі відхилення безпосередньо впливають на розкид наведених витрат повітря по контурах. Саме нерівномірність витрат повітря безпосередньо змінює процес сумішоутворення і локальні співвідношення «паливо–повітря» в зоні горіння. Це зумовлює просторову неоднорідність тепловиділення, формування температурних градієнтів і появу локальних зон підвищених температур. Саме локальні пікові температури, а не середній температурний рівень, у більшості випадків визначають інтенсивність процесів повзучості, термовтоми та окиснювального руйнування жаронапружених деталей камери згоряння та турбіни [1-3].

Практична важливість такого підходу підтверджується виробничими даними. Під час стендових випробувань двигуна на режимі максимальної частоти обертання ротора було зафіксовано різке зростання температури газу за турбіною, яке суттєво перевищувало температуру обмеження газів за турбіною, після чого двигун був зупинений системою захисту від перегріву. Після зупинки, під час огляду, виявлено прогар зовнішнього корпусу соплового апарата та руйнування двох лопаток соплового апарата 1 ступеня. Після всебічного дослідження цього випадка зазначено локальний характер дії високої температури як характерну ознаку розвитку дефекту.

Виготовлення консолідованого завихрювача адитивним методом L-PBF створює можливість зменшити геометричні відхилення, покращити якість внутрішніх поверхонь проточних каналів і підвищити повторюваність витратних характеристик партії деталей. У зв'язку з цим встановлення впливу методу виготовлення на нерівномірність витрат повітря як одного з найважливіших факторів формування характеру температурного поля, надійності й ресурсу завихрювача є актуальним науковим і прикладним завданням [1-7].

1.2 Стан питання

У сучасних дослідженнях завихрювач камери згоряння авіаційного газотурбінного двигуна розглядається як один із ключових елементів, що визначає структуру закрученого потоку, інтенсивність сумішоутворення, параметри зони рециркуляції та характер температурного поля на виході з камери згоряння [1, 2]. Показано, що зміна геометрії завихрювача, закрутки, взаємного напрямку обертання ступенів і конфігурації рециркуляційної зони безпосередньо впливає на формування високотемпературних зон і рівномірність температурного поля на виході з камери згоряння [1, 3].

Проблема нерівномірності температурного поля на виході з камери згоряння безпосередньо пов'язана з надійністю та ресурсом гарячої частини двигуна. У сучасних дослідженнях показано, що гарячі смуги та локальні температурні піки підвищують теплове навантаження на лопатки турбіни, погіршують умови охолодження та знижують довговічність деталей. Водночас зміна параметрів закрутки та структури течії в первинній зоні може приводити до істотної зміни коефіцієнтів OTDF і RTDF, тобто безпосередньо впливати на рівномірність температурного поля [2, 3].

Паралельно з розвитком підходів до аеродинамічної оптимізації камер згоряння інтенсивно розвиваються технології адитивного виготовлення жароміцних деталей із нікелевих суперсплавів. У сучасних оглядах показано, що L-PBF є одним із найперспективніших методів виготовлення складнопрофільних тонкостінних елементів із внутрішніми каналами, оскільки він дає змогу реалізувати геометрії, які є технологічно складними або економічно неефективними для традиційного лиття. Для нікелевих суперсплавів цей підхід вважається придатним для аерокосмічних застосувань за умови контролю дефектності, постобробки та забезпечення стабільних властивостей матеріалу [4].

Разом з тим, сам факт переходу до адитивного виготовлення ще не гарантує покращення характеристик завихрювача. Одним із критичних факторів залишається шорсткість внутрішньої поверхні проточних каналів. Для адитивно виготовлених вихрових завихрювачів показано, що шорсткість поверхні впливає на перепад тиску, структуру течії, межі стабільності полум'я та параметри викидів [5]. У новіших роботах також підкреслено, що для адитивного виробництва необхідне адекватне врахування реальної шорсткості в CFD-моделях, оскільки необроблена поверхня може істотно змінювати локальну аеродинаміку та робочі характеристики вузла [6].

Незважаючи на значну кількість сучасних публікацій, більшість із них присвячена або впливу геометрії завихрювача на температурне поле, або загальним питанням адитивного виготовлення нікелевих суперсплавів [1-4]. Значно менше уваги приділено прямому порівнянню методів виготовлення завихрювача: традиційного лиття та L-PBF – саме з позицій нерівномірності витрати повітря як показника, який поєднує технологічну якість виготовлення з надійністю та ресурсом вузла. Саме ця невирішена частина проблеми є предметом даної роботи.

1.3 Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є встановлення впливу методу виготовлення завихрювача камери згоряння

авіаційного газотурбінного двигуна на нерівномірність розподілу повітря по контурах і визначення ролі цього фактора в формуванні надійності й ресурсу вузла. Досягнення цієї мети дозволяє обґрунтувати доцільність переходу від традиційної ливарної багатодетальної конструкції до адитивно виготовленої монодеталі як практичного способу підвищення повторюваності характеристик, зниження ризику локальних перегрівів і збільшення ресурсу завихрювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

а) виконати порівняльний аналіз конструктивно-технологічних особливостей литого та адитивно виготовленого завихрювачів;

б) оцінити вплив методу виготовлення на геометричну точність, стан поверхні проточних каналів і нерівномірність наведеної витрати повітря в контурах;

в) встановити зв'язок між нерівномірністю витрати повітря, характером температурного поля та ресурсними ризиками завихрювача та суміжних деталей гарячої частини двигуна;

г) обґрунтувати інженерну доцільність застосування адитивно виготовленої монодеталі для підвищення надійності та ресурсу завихрювача камери згоряння.

Стаття структурована таким чином. У розділі 2 наведено матеріали та методи дослідження. У розділі 3 подано результати дослідження та їх обговорення. У розділі 4 сформульовано основні висновки й наведено перспективи подальших досліджень.

2. Матеріали та методи дослідження

У роботі виконано порівняльне дослідження завихрювачів камери згоряння авіаційного газотурбінного двигуна, виготовлених двома методами: традиційною ливарною технологією у вигляді багатодетальної конструкції та адитивним методом L-PBF (laser powder bed fusion) у вигляді монодеталі. Такий підхід дозволив оцінити вплив методу виготовлення на геометричну точність, шорсткість проточних каналів, нерівномірність зведеної витрати повітря в контурах і, через ці показники, на надійність і ресурс вузла [7, 8].

Об'єктом експериментального порівняння були серійні литі завихрювачі та адитивно виготовлені монодеталі-завихрювачі однакового функціонального призначення кількістю по тридцять одиниць кожного. Для адитивного варіанта як базовий матеріал обрано нікелевий суперсплав IN 718 AMS 5662, що зумовлено його високими міцнісними та жароміцними характеристиками в температурному діапазоні,

відповідному умовам роботи завихрювача. Виготовлення адитивних деталей здійснювали методом L-PBF, який у сучасних роботах розглядається як один із базових підходів до виробництва жароміцних деталей із внутрішніми складнопрофільними каналами [7, 8].

Адитивне виготовлення монодеталі завихрювача виконували на установці EOS M 400 (EOS GmbH, Німеччина), призначеній для промислового виготовлення металевих деталей методом порошкового лазерного сплавлення. Для платформи EOS M 400 офіційно заявлено робочий об'єм побудови $400 \times 400 \times 400$ мм, що забезпечує виготовлення великогабаритних або групових партій тонкостінних деталей складної геометрії [9]. Геометричне зображення монодеталі-завихрювача показано на рис. 1 [10].

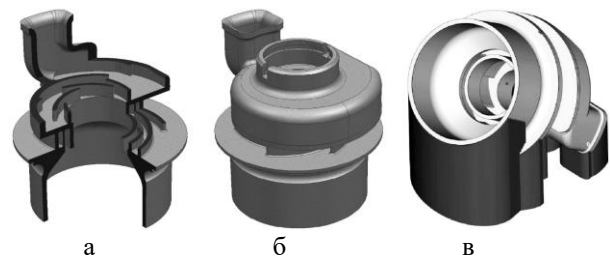


Рис. 1. Геометричне зображення монодеталі-завихрювача: а – ступінчастий переріз; б – тривимірна модель монодеталі-завихрювача; в – модель монодеталі-завихрювача з підтримкою [10]

Після друку монодеталі-завихрювачі підлягали комплексу постобробки, який включав видалення підтримок, гаряче ізостатичне пресування, термічну обробку та завершальні технологічні операції, необхідні для зниження дефектності, стабілізації структури та підготовки виробу до контролю та подальшого складання [4, 7, 10]. Для монодеталі-завихрювача був відпрацьований маршрут постобробки, що включав 14 технічних операцій.

Дослідження шорсткості та геометричних параметрів поверхонь внутрішніх проточних каналів завихрювачів здійснювали на зразках, отриманих шляхом електроерозійного різання вихідних деталей, у кількості 3-х одиниць, за відповідними перерізами повітряного та паливоповітряного контурів.

Оцінювання геометричної точності завихрювачів виконували методом 3D-сканування на 3D-сканері Atos Triple Scan компанії GOM (GOM GmbH, Німеччина) та накладення її на CAD-модель з використанням програмного забезпечення ATOS Professional з подальшим зіставленням реальної поверхні з CAD-моделлю завихрювача (рис. 2) [11]. Керування процесом 3D-сканування та обробку отриманих даних здійснювали за допомогою програмного

забезпечення ATOS Professional. Програмне забезпечення забезпечує керування параметрами сканування, автоматичне об'єднання окремих сканів, побудову полігональних моделей, а також порівняння отриманих 3D-даних з CAD-моделлю [10]. Кількісне порівняння проводили за полем відхилень, середніми та максимальними відхиленнями характерних елементів проточної частини. Такий підхід дає змогу оцінити не лише окремі лінійні розміри, а й просторову відтворюваність геометрії каналів, яка є визначальною для гідравлічного опору та рівномірності подачі повітря.

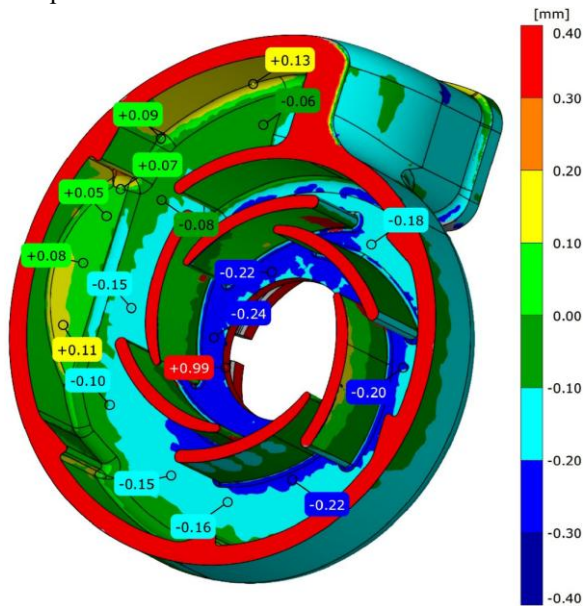


Рис. 2. Результати відхилень геометричних розмірів завихрювача, виготовленого адитивним методом від розмірів створеної тривимірної моделі [10].

Шорсткість поверхні внутрішніх порожнин і проточних каналів визначали профілометричним методом із використанням приладу Perthometer M3 виробництва Mahr (Mahr GmbH, Німеччина) [12]. Вимірювання виконували з нормованою довжиною відсічки та базовою довжиною оцінювання профілю, а порівняння здійснювали за параметром Ra профільним методом відповідно до актуальної системи ISO 21920 [13, 14]. Кількість деталей визначена за ISO 2859-1 [15].

Експериментальне визначення фізичної та наведеної витрати повітря через завихрювачі виконували на стаціонарній вимірювальній продувній установці, призначеній для контролю пропускної спроможності елементів повітряно-паливних трактів деталей камер згоряння авіаційних газотурбінних двигунів. Контроль проводили окремо по паливоповітряному та повітряному контурах, а також сумісно по двох контурах [7]. Для порівняння використовували показники середньої зведеної витрати, абсолютного розмаху,

середньоквадратичного відхилення та коефіцієнта нерівномірності. Критерієм комплектування був допустимий коридор $\pm 1,5\%$ відносно наведеної витрати повітря завихрювачів у партії.

Оцінювання впливу нерівномірності витрати повітря на надійність і ресурс виконували з урахуванням результатів контролю температурного поля камери згоряння та даних тривимірного CFD-моделювання, валідація якого здійснювалася за стендовими даними [10]. При інтерпретації результатів виходили з того, що для ресурсної оцінки визначальними є не середньоінтегральна температура, а локальні пікові значення та нерівномірність температурного поля на виході з камери згоряння. Для порівняння експлуатаційної придатності конструктивно-технологічних рішень використовували також виробничі дані щодо дефектів, викликаних локальним перегрівом деталей гарячої частини двигуна.

Кількісне порівняння результатів для литих і адитивно виготовлених завихрювачів здійснювали за відносними відхиленнями, абсолютним розмахом, середньоквадратичним відхиленням і коефіцієнтом нерівномірності. Такий підхід дозволяє перейти від опису окремих вимірювань до оцінки повторюваності технологічного результату, що є важливим для галузевого машинобудування, де працездатність вузла визначається не лише параметрами окремого зразка, а й стабільністю партії загалом.

3. Результати та обговорення

3.1 Геометрична відтворюваність завихрювачів

Порівняння литих і адитивно виготовлених завихрювачів показало, що метод виготовлення безпосередньо впливає на геометричну відтворюваність внутрішніх поверхонь проточної частини. За результатами 3D-сканування встановлено, що для завихрювачів, виготовлених методом L-PBF, характерне суттєве зменшення середніх і максимальних відхилень відносно CAD-моделі, а також звуження поля відхилень порівняно з традиційною ливарною технологією. Це свідчить про вищу стабільність формування повітряного та паливоповітряного каналів при переході до адитивно виготовленої монодеталі.

Отриманий результат узгоджується із загальними уявленнями про роль геометрії завихрювача в формуванні закрученого потоку. Навіть порівняно невеликі зміни конфігурації каналів і умов течії в первинній зоні здатні змінювати рециркуляцію, локальне співвідношення «паливо-повітря» та просторовий розподіл температури [1, 2]. Отже, краща геометрична відтворюваність при L-PBF є не лише техно-

логічною перевагою, а й чинником підвищення стабільності роботи вузла.

3.2 Шорсткість внутрішніх поверхонь

Для литих завихрювачів шорсткість внутрішніх порожнин становила Ra від 3,3 мкм до 7,9 мкм, тоді як для адитивно виготовлених – Ra від 1,5 до 3,9 мкм (рис. 3). Таким чином, L-PBF у поєднанні з відпрацьованим маршрутом постобробки забезпечує не лише конструктивну консолідацію вузла, а й кращу якість внутрішніх поверхонь, що визначають гідравлічний опір каналів.

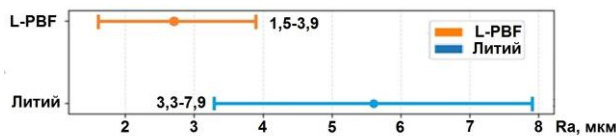


Рис. 3. Порівняння шорсткості внутрішніх порожнин литого та адитивно виготовленого завихрювачів

Отримані результати мають важливе інженерне значення. У літературі показано, що для адитивно виготовлених вихрових пальників шорсткість впливає на структуру течії, перепад тиску, межі стабільності полум'я та характер рециркуляції [5, 6]. У межах даної роботи нижча шорсткість внутрішніх порожнин адитивно виготовленого завихрювача супроводжується меншим розкидом витратних характеристик, тому шорсткість слід розглядати як один із факторів, через який метод виготовлення впливає на надійність і ресурс вузла.

3.3 Нерівномірність витрати повітря в контурах завихрювача

Ключовим результатом дослідження є встановлення прямого впливу методу виготовлення на нерівномірність наведеної витрати повітря по контурах завихрювача. За результатами продувок показано, що при близьких середніх значеннях витрати адитивно виготовлений завихрювач характеризується істотно меншим розкидом параметрів, ніж литий аналог. Для повітряного та паливоповітряного контурів абсолютний розмах витрати зменшився більш ніж у 2,5 та 2,8 рази відповідно, а коефіцієнт нерівномірності знизився з 12,1 % до 4,9 % у повітряному контурі та з 11,6 % до 4,1 % у паливоповітряному. При сумісній оцінці двох контурів коефіцієнт нерівномірності наведеної витрати повітря зменшився з 3,90 % для литого завихрювача до 2,29 % для надрукованого (рис. 4).

Ці результати підтверджують, що саме підвищення геометричної відтворюваності каналів і зменшення шорсткості внутрішніх поверхонь забезпечують більш стабільну витратну характеристику від деталі до деталі. Для завихрювача камери згоряння це має принципове значення, оскільки навіть при збереженні середнього рівня витрати саме її розкид визначає неоднорідність повітророзподілу по контурах і подальшу деформацію температурного поля в зоні горіння [7].

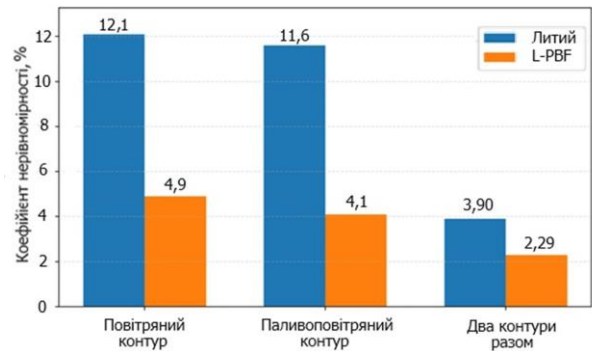


Рис. 4. Вплив методу виготовлення на коефіцієнт нерівномірності витрати повітря в контурах завихрювача.

3.4 Комплектування завихрювачів

Додатковим практичним підтвердженням переваги адитивного методу виготовлення стали результати комплектування завихрювачів за критерієм допустимого коридору $\pm 1,5$ % зведеної витрати повітря у комплекті, згідно з програмою випробувань щодо визначення витрати повітря. Встановлено, що для адитивно виготовлених завихрювачів розподіл значень зведеної витрати є компактнішим, що забезпечує більший запас придатних завихрювачів і зменшує трудомісткість комплектування. Для литої партії за результатами продувок було забраковано 3 завихрювачі, що становить 10 % від партії з 30 одиниць, тоді як увесь комплект монодеталей-завихрювачів, виготовлених методом L-PBF, був установлений у жарову трубу для подальшого складання камери згоряння.

З позицій галузевого машинобудування це означає, що метод виготовлення впливає не лише на газодинамічні параметри окремого завихрювача, а й на виробничу придатність партії в цілому. Зниження нерівномірності витрати повітря забезпечує менший обсяг відбракування, спрощує підбір комплектів і підвищує технологічну ефективність виготовлення камери згоряння.

3.5 Зв'язок витратних характеристик із температурним полем

Порівняння CFD-розрахунку з експериментом показало, що для друкованого завихрювача середні температури по радіальних поясах мають принципову відмінність для різних технологій виготовлення: для литих завихрювачів значення τ_{en} коливаються від $-2,9\%$ до $+1,7\%$, для друкованих – від $0,7\%$ до $4,3\%$, що істотно ближче до CFD-прогнозу (рис. 5). Мінімальні температури газу на виході з камери згоряння для обох експериментальних варіантів лежать для литих завихрювачів у діапазоні від $790\text{ }^\circ\text{C}$ до $850\text{ }^\circ\text{C}$, для друкованих – від $780\text{ }^\circ\text{C}$ до $825\text{ }^\circ\text{C}$.

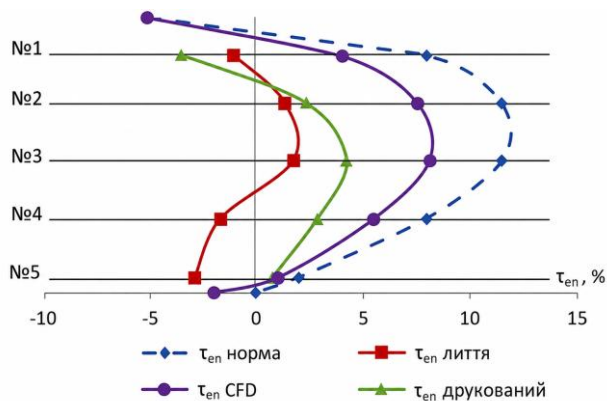


Рис. 5. Радіальна епюра нерівномірності температурного поля

За результатами дослідження підтверджено, що CFD-модель коректно відтворює просторову структуру температурного поля й може бути використана для оцінювання впливу геометрії та витратних характеристик на тепловий стан вузла. При цьому для адитивно виготовлених завихрювачів встановлено формування більш стабільного температурного поля, а причинно-наслідкова послідовність має такий вигляд: зменшення геометричних відхилень приводить до зменшення нерівномірності витрат, це звужує розподіл коефіцієнта надлишку повітря в зоні горіння, знижує температурну нерівномірність, зменшує пікові температури та, як наслідок, підвищує ресурс вузла.

Саме тому нерівномірність витрати повітря можна використовувати як інженерний показник раннього прогнозування температурної нерівномірності та ресурсних ризиків.

3.5 Виробниче підтвердження ролі локальних перегрівів

Виробничі дані також підтверджують вирішальну роль локальних перегрівів у вичерпанні ресурсу

вузлів камери згоряння та турбіни. Під час стендових випробувань двигуна на максимальному режимі було зафіксовано стрімке зростання температури газу за турбіною, після чого двигун був зупинений системою захисту від перегріву. Після зупинки виявлено прогар зовнішнього корпусу соплового апарата та руйнування двох лопаток соплового апарата 1 ступеня (рис. 6). За результатами досліджень встановлено, що характер пошкоджень вказує на локальну дію підвищеної температури, і саме така локальність є характерною ознакою розвитку дефекту.



Рис. 6. Прогар зовнішнього корпусу соплового апарата та руйнування двох лопаток соплового апарата 1-го ступеня

Наведені дані не використовуються як пряме підтвердження ефективності адитивного завихрювача, однак вони мають важливе значення для інтерпретації одержаних результатів. Вони доводять, що ресурс камери згоряння реально визначається не середнім температурним рівнем, а локальними гарячими зонами, які можуть формуватися внаслідок нерівномірного розподілу робочого середовища. У цьому контексті зменшення нерівномірності витрати повітря при переході до L-PBF-монодеталі слід розглядати як фактор зниження ризику локальних перегрівів і підвищення надійності й ресурсу завихрювача та суміжних деталей.

3.5 Перевірка функціональної придатності у складі двигуна

Функціональна придатність запропонованого конструктивно-технологічного рішення була перевірена під час типових випробувань технологічного двигуна з камерою згоряння, оснащеною адитивно виготовленими завихрювачами. Випробування пройшли успішно, всі контрольні параметри відповідали технічним умовам, а напрацювання двигуна склало 1 годину 41 хвилину. Протягом усього часу роботи двигуна відхилення контрольованих параметрів тем-

ператури газу, тиску, витрати повітря та палива перебували в межах допустимих значень. Після завершення випробувань, за результатами дефектування, не виявлено ознак локального перегріву, термічної деформації або деградації поверхонь завихрювача та деталей камери згоряння (рис. 7).

Отже, підтверджено, що зменшення нерівномірності витрати повітря, досягнуте завдяки переходу до адитивно виготовленої монодеталі, не лише покращує проміжні технологічні та газодинамічні показники, а й забезпечує працездатність вузла в складі реального двигуна. Вплив методу виготовлення на витратні характеристики має безпосередній вихід на показники надійності та ресурсу.



Рис. 7. Стан деталей камери згоряння після типових випробувань технологічного двигуна [10]

4. Висновки

1. Установлено, що метод виготовлення завихрювача камери згоряння авіаційного газотурбінного двигуна є суттєвим чинником формування його витратних характеристик, надійності та ресурсу.

2. Показано, що адитивно виготовлений завихрювач має кращу якість внутрішніх поверхонь проточної частини: шорсткість внутрішніх порожнин становить R_a від 1,5 до 3,9 мкм проти R_a від 3,3 до 7,9 мкм у литих аналогів.

3. Експериментально доведено, що при близьких середніх значеннях витрати повітря адитивно виготовлений завихрювач характеризується істотно меншою нерівномірністю наведеної витрати в контурах: коефіцієнт нерівномірності зменшився з 12,1 % до 4,9 % у повітряному контурі, з 11,6 % до 4,1 % у паливоповітряному та з 3,90 % до 2,29 % при сумісній оцінці двох контурів.

4. Установлено, що зменшення нерівномірності витрати повітря має не лише газодинамічне, а й ресурсне значення, оскільки через стабілізацію сумішоутворення та температурного поля знижує ймовірність формування локальних перегрівів у вузлах гарячої частини двигуна.

5. Показано, що перехід до L-PBF-монодеталі

підвищує технологічну ефективність виготовлення вузла: за критерієм комплектування $\pm 1,5$ % адитивно виготовлені завихрювачі мають компактніший розподіл зведеної витрати, тоді як у литій партії було забраковано 10 % деталей.

6. Виробничі дані підтвердили, що локальні перегріти зони є реальним ресурсообмежувальним фактором для вузлів камери згоряння й турбіни: при перевищенні граничної температури зафіксовано локальний перегрів, прогар елементів і руйнування деталей соплового апарата.

7. Типові випробування технологічного двигуна з камерою згоряння, оснащеною адитивно виготовленими завихрювачами, пройшли успішно, що підтверджує функціональну придатність запропонованого конструктивно-технологічного рішення та його позитивний вплив на надійність і ресурс вузла.

8. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням експериментальної бази для різних конфігурацій завихрювачів, уточненням впливу паливорозподілу на локальні температурні піки та проведенням довготривалих ресурсних випробувань для кількісної оцінки довговічності вузла.

Внесок авторів: огляд та аналіз інформаційних джерел – Д.О. Куц, О.О. Калініченко; формулювання мети і постановки задачі дослідження – В.С. Єфанов, Д.О. Куц; проведення розрахунків – Д.О. Куц; аналіз результатів дослідження – О.В. Овчинников; формулювання висновків – О.В. Омельченко, 3-D моделювання – Р.Б. Осіпчук

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів у зв'язку з цим дослідженням, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на результати дослідження, подані в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводились без фінансової підтримки.

Доступність даних

Робота має пов'язані дані у сховищі даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що під час створення представленої роботи вони не використовували методи штучного інтелекту.

Подяки

Автори висловлюють подяку фахівцям, які брали участь у проведенні стендових випробувань, контролі геометричних і витратних характеристик та

підготовці експериментальних даних для аналізу.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Numerical simulations on the effect of swirler installation angle on outlet temperature distribution in gas turbine combustors / K. Wang, F. Li, T. Zhou, D. Wang // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 240. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122252>.

2. Effect of swirler geometry on the outlet temperature profile performance of a model gas turbine combustor / C. Tang, Q. Yao, W. Jin et al. // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 260. – 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124946>.

3. The effects of flame-coupling on exit temperature distribution in a centrally-staged combustor / J. Wang, X. Yan, Z. Wang et al. // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 279. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127875>.

4. Shahwaz, M. Recent advances in additive manufacturing technologies for Ni-based Inconel superalloys: a comprehensive review / M. Shahwaz, S. Ahmad, M. Aadil // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2025. – Vol. 1010. – 27 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177654>.

5. Characterization of Additive Layer Manufacturing Swirl Burner Surface Roughness and Its Effects on Flame Stability Using High-Speed Diagnostics / J. Runyon, A. Giles, R. Marsh et al. // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2020. – Vol. 142, iss. 4. – 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044950>.

6. Critical Appraisal of Integrated Computational Fluid Dynamics/Surface Roughness Models for Additive Manufactured Swirl Burners / R. Al-Ajmi, M. Al-Shagh-dari, B. Goktepe et al. // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2025. – Vol. 147, iss. 9. – 9 p. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4067738>.

7. Additive technologies for manufacturing swirlers of the combustion chamber of aircraft engines from nickel superalloy powders / D. Kuts, V. Yefanov, O. Halienkova et al. // *Archives of Materials Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 131, iss. 1. – P. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.0368>.

8. Yadroitsev, I. Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals / I. Yadroitsev, I. Yadrivtseva, A. du Plessis, E. MacDonald. – Amsterdam : Elsevier, 2021. – 614 p.

9. EOS M 400 / EOS GmbH. – Access mode: <https://www.eos.info/metal-solutions/metal-printers/eos-m-400> (accessed: 15.05.2026). – Title from screen.

10. Design of a consolidated swirler monopart structure by optimizing the processes of micrometallurgical layer-to-layer fusion of heat-resistant alloys / V. Yefanov, O. Kalinichenko, D. Kuts et al. // *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies. – 2026. – Vol. 2, iss. 1(140). – P. 91–104. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.359455>.

11. ATOS | GOM Inspect Professional | VMR : Process-safe 3D measuring and inspection software. – Access mode: <https://www.ats.co.il/wp-content/uploads/2022/01/%D7%9E%D7%A4%D7%A8%D7%98-%D7%98%D7%9B%D7%A0%D7%99-.pdf> (accessed: 15.05.2026).

12. Perthometer M3. Surface roughness measuring instrument. Technical data and operating instructions / Mahr GmbH. – Göttingen : Mahr GmbH, 2018. – 72 p.

13. ISO 21920-2:2021. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. – Available at: <https://www.iso.org/standard/72226.html> (accessed: 15.05.2026). – Title from screen.

14. ISO 21920-3:2021. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 3: Specification operators. – Available at: <https://www.iso.org/standard/72228.html> (accessed: 15.05.2026). – Title from screen.

15. ISO 2859-1:2026. Sampling procedures for inspection by attributes — Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection. – Available at: <https://www.iso.org/standard/85464.html> (accessed: 15.05.2026). – Title from screen.

References

1. Wang, K., Li, F., Zhou, T., Wang, D. Numerical simulations on the effect of swirler installation angle on outlet temperature distribution in gas turbine combustors. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 240. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122252>.

2. Tang, C., Yao, Q., Jin, W., Li, J., Yan, Y., Yuan, L. Effect of swirler geometry on the outlet temperature profile performance of a model gas turbine combustor. *Applied Thermal Engineering*, 2025, vol. 260. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124946>.

3. Wang, J., Yan, X., Wang, Z., Hui, X., Zhang C., Tao, W., Sung, C.-J. The effects of flame-coupling on exit temperature distribution in a centrally-staged combustor, *Applied Thermal Engineering*, 2025, vol. 279. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127875>.

4. Shahwaz, M., Ahmad, S., Aadil, M. Recent advances in additive manufacturing technologies for Ni-based Inconel superalloys: a comprehensive review. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1010. 27 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177654>.

5. Runyon, J., Giles, A., Marsh, R., Pugh, D., Goktepe, B., Bowen, P., Morris, S. Characterization of Addi-

tive Layer Manufacturing Swirl Burner Surface Roughness and Its Effects on Flame Stability Using High-Speed Diagnostics. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2020, vol. 142, iss. 4. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044950>.

6. Al-Ajmi, R., Al-Shaghdari, M., Goktepe, B., Pso-moglou, I., Bowen, P. Critical Appraisal of Integrated Computational Fluid Dynamics/Surface Roughness Models for Additive Manufactured Swirl Burners. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2025, Vol. 147, iss. 9. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4067738>.

7. Kuts, D., Yefanov, V., Halienkova, O., Ovchynnykov, O., Tepla, T., Lemishka, I., Mierzwiński, D. Additive technologies for manufacturing swirlers of the combustion chamber of aircraft engines from nickel superalloy powders. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2025, vol. 131, iss. 1, pp. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.0368>.

8. Yadroitsev, I., Yadriotsava, I., du Plessis, A., MacDonald, E. *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*. Amsterdam, Elsevier, 2021. 614 p.

9. EOS GmbH / EOS M 400, 2026. Available at: <https://www.eos.info/metal-solutions/metal-printers/eos-m-400> (accessed 15 May 2026).

10. Yefanov, V., Kalinichenko, O., Kuts, D., Ovchynnykov, O., Laptieva, H. Design of a consolidated swirler monopart structure by optimizing the processes of micrometallurgical layer-to-layer fusion of heat-resistant alloys. *Eastern-European Journal of Enterprise*

Technologies, 2026, vol. 2, iss. 1(140), pp. 91–104. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.359455>.

11. ATOS | GOM Inspect Professional | VMR: Process-safe 3D measuring and inspection software. Available at: <https://www.atos.co.il/wp-content/uploads/2022/01/%D7%9E%D7%A4%D7%A8%D7%98-%D7%98%D7%9B%D7%A0%D7%99-.pdf> (accessed 15 May 2026).

12. Mahr GmbH. Perthometer M3. Surface roughness measuring instrument. Technical data and operating instructions. Göttingen : Mahr GmbH, 2018. 72 p.

13. ISO 21920-2:2021. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*, 2021. Available at: <https://www.iso.org/standard/72226.html> (accessed 15 May 2026).

14. ISO 21920-3:2021. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 3: Specification operators*, 2021. Available at: <https://www.iso.org/standard/72228.html> (accessed 15 May 2026).

15. ISO 2859-1:2026. *Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection*, 2026. Available at: <https://www.iso.org/standard/85464.html> (accessed 15 May 2026).

Надійшла до редакції 09.05.2026, отримано у доопрацьованому вигляді 03.06.2026
Дата ухвалення 15.06.2026, дата публікації 17.06.2026

INFLUENCE OF MANUFACTURING METHOD ON UNEVENNESS OF AIR FLOW, RELIABILITY, AND LIFE OF THE SWIRLER OF THE COMBUSTION CHAMBER OF AN AVIATION GAS TURBINE ENGINE

*Dmytro Kuts, Volodymyr Yefanov, Oleksiy Omelchenko,
Oleh Kalinichenko, Oleksandr Ovchynnykov, Radomir Osipchuk*

The **subject matter** of the article is the flow characteristics of the combustion chamber swirler of an aircraft gas turbine engine, as well as the reliability and service life of the unit. The **aim** of the study is to determine the influence of the manufacturing method on airflow non-uniformity in the swirler circuits and to define the role of this factor in the formation of swirler reliability and service life under real thermogasdynamic loading conditions. The **tasks** to be solved are: to perform a comparative analysis of cast and additively manufactured swirlers; to assess the influence of the manufacturing method on geometric accuracy, surface roughness, and airflow non-uniformity; to establish the relationship between airflow non-uniformity, the nature of the temperature field, and service-life-related risks of the unit; and to substantiate the feasibility of transitioning to an additively manufactured monolithic component. The **methods** used include 3D scanning, profilometric roughness control, flow testing of the air and fuel-air circuits, CFD analysis, and comparison with production data. The following **results** were obtained. For additively manufactured swirlers, the roughness of internal cavities ranges from Ra 1.5 μm to 3.9 μm , whereas for cast swirlers it ranges from Ra 3.3 μm to 7.9 μm ; in addition, the geometric reproduction accuracy increased twofold. According to the flow test results, the airflow non-uniformity coefficient decreases from 12.1% to 4.9% in the air circuit, from 11.6% to 4.1% in the fuel-air circuit, and from 3.90% to 2.29% in the combined assessment of both circuits. For the cast batch, the rejection rate was 10%, which confirms the lower repeatability of flow characteristics when the conventional manufacturing technology is used. It is shown that improved geometric reproducibility and reduced roughness of the flow channels lead to lower hydraulic resistance scatter and a more stable air distribution among the circuits. **Conclusions.** The scientific novelty of

the obtained results is as follows: 1) it has been established that the swirler manufacturing method directly affects airflow non-uniformity and, through it, the temperature field, reliability, and service life of the swirler; 2) it has been shown that better geometric reproducibility and lower roughness of the internal surfaces reduce the probability of local overheating, which is the decisive factor in reducing the service life of hot-section engine components. The obtained results are of practical importance for swirler matching and assembly, prediction of service-life-related risks, and improvement of manufacturing processes for critical combustion chamber components of aircraft gas turbine engines.

Keywords: *swirler, combustion chamber, aircraft gas turbine engine, L-PBF, airflow non-uniformity, reliability, service life.*

Куц Дмитро Олексійович – аспірант кафедри енергетики, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, провідний конструктор управління головного конструктора АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна.

Єфанов Володимир Сергійович – доктор філософії, заступник директора Навчально-наукового інституту «Титан», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна.

Омельченко Олексій Валентинович – аспірант кафедри «Машини і технологія ливарного виробництва» НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

Калініченко Олег Олександрович – канд. техн. наук, кафедра технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна.

Овчинников Олександр Володимирович – доктор техн. наук, професор, директор Навчально-наукового інституту «Титан», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна.

Осіпчук Радомир Борисович – аспірант кафедри енергетики, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна.

Dmytro Kuts – Postgraduate Student of the Department of Energy, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, Lead Designer of Main Designer Office JSC "MOTOR SICH", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kda-74@meta.ua, ORCID: 0009-0000-3110-4978.

Volodymyr Yefanov – PhD, Deputy Director of the Educational and Scientific Institute "Titan", Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: vsyefanov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6363-4081, Scopus ID: 57216864306.

Oleksiy Omelchenko – Postgraduate Student of the Department of Machinery and Foundry Technology of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kartzpua@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1693-395X.

Oleh Kalinichenko – PhD at the Department of Fuel, Polymer, and Polygraphic Materials Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: kalinichenkooleg1@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5597-6084.

Oleksandr Ovchynnykov – Doctor of Technical Science, Director of the Educational and Scientific Institute "Titan", Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: iaov31@gmail.com, ORCID: 0009-0006-5887-0676, Scopus ID: 57192110535

Radomir Osipchuk – Postgraduate Student of the Department of Energy, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: ukrainnish@gmail.com, ORCID: 0009-0007-6017-5143