



**КРАВЧЕНКО**  
**Ігор Федорович** –  
доктор технічних наук,  
Генеральний конструктор –  
директор ДП «Івченко-Прогрес»

## СПІВРОБІТНИЦТВО ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС» З УСТАНОВАМИ НАН УКРАЇНИ

---

Вельмишановні члени Академії!

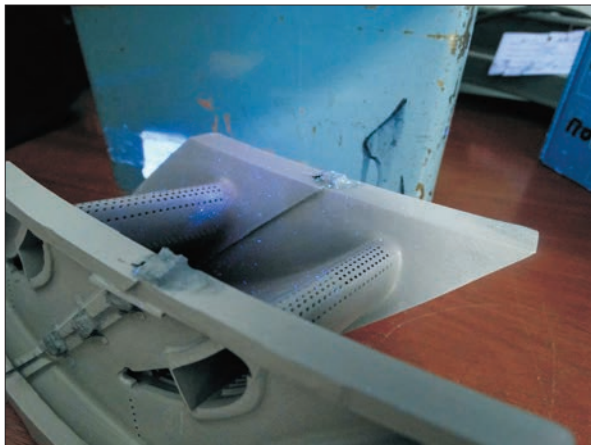
Вельмишановні присутні!

Авіаційний газотурбінний двигун – це складний, наукомісткий, високовартісний продукт, який можна створити лише в тісній співпраці досвідченого конструкторського бюро, науки і виробництва. Тому без участі науковців НАН України годі й сподіватися на розроблення нового перспективного конкурентоспроможного двигуна.

Домінуюча тенденція розвитку газотурбінних двигунів (ГТД) характеризується неухильним зростанням параметрів робочого процесу, що неминуче призводить до збільшення навантажень, які діють на конструктивні елементи двигуна. Очевидно, що сьогодні створення конкурентоспроможних, надійних двигунів з високими питомими параметрами і великим ресурсом просто неможливе без застосування новітніх матеріалів.

Особливе місце в питаннях матеріалознавства газотурбінних двигунів посідає проблема забезпечення конструкційної міцності найбільш теплонапружених вузлів і деталей двигуна, що працюють за високих температур і знакозмінних силових навантажень в умовах динамічного контакту з агресивними середовищами. Найгостріше тут стоїть питання довговічності турбінних лопаток, працездатність яких багато в чому визначає економічність, ресурс ГТД, вартість однієї години його життєвого циклу.

Так, у результаті співпраці з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України було відпрацьовано технологічний процес виготовлення в дослідному виробництві секторів лопаток турбіни соплового апарата газотурбінного двигуна (рис. 1) з використанням з'єднання окремих литих лопаток у сектор методом реакційно-дифузійного з'єднання. Оцінку якості з'єднання виконано за допомогою неруйнівних методів контролю (ЛЮМ1-ОВ), а також металографічно на



**Рис. 1.** Дволопатковий сектор соплового апарата турбіни виробу Д18-Т серії ЗМ (прототип); з'єднання виконано методом реакційно-дифузійного з'єднання за технологією, розробленою в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України



**Рис. 2.** Результати випробувань перспективних керамічних матеріалів для деталей гарячої частини турбогвинтових двигунів, розроблених в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України: *а* – зразок у потоці газів пальника; *б* – стан зразка після 6000 циклів

технологічному зразку. Тривала міцність цього типу з'єднання становить не менш як 80% міцності основного матеріалу. Розроблено також технологію виготовлення зварних біметалевих дисків турбіни.

Спільно з Інститутом проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України та ПАТ «Мотор Січ» проводяться роботи з доводки механічних характеристик розроблених в ІПМ НАНУ сплавів для їх застосування на двигунах корпорації «Івченко». Договірні роботи виконуються за такими темами:

- жароміцні ніобієві сплави для робочих і соплових лопаток газотурбінних двигунів;
- високоміцні алюмінієві сплави для вентилятора і корпусних деталей;
- високотемпературні титанові сплави (працездатність до 700 °С) для робочих лопаток останніх ступенів компресорів і турбін авіаційних ГТД;
- інтерметалідні сплави  $\gamma\text{TiAl}$  для деталей авіаційних ГТД;
- високотемпературні композитні матеріали;
- жароміцні сплави на основі хрому.

За цими напрямками прийнято рішення про практичне випробування та впровадження нових сплавів для натурних деталей двигунів.

Тривають роботи із застосування керамічних матеріалів, підібрано оптимальний склад кераміки для виготовлення елементів конструкцій камер згоряння. Починаючи з 2011 р. проводиться комплекс робіт з дослідження кераміки для виготовлення деталей камери згоряння, в рамках яких виконано дослідження зразків і натурних елементів з кераміки на основі карбіду кремнію, оксиду алюмінію, бориду цирконію різного складу до і після проведення термоциклічних випробувань (рис. 2).

На ДП «Івченко-Прогрес» було випробувано чотири різні склади високотемпературної кераміки на основі бориду цирконію, розроблені в ІПМ НАНУ. Дослідження включали:

- контроль стану зразків неруйнівними методами;
- проведення термоциклічних випробувань для оцінки термостійкості досліджуваних зразків;

- виявлення зміни фізико-механічних властивостей кераміки (границя міцності при поперечному вигині) залежно від кількості циклів.

Термоциклічні випробування зразків виконано в режимі  $1500 \leftrightarrow 500$  °С; час витримки за цих температур — по 1 хв. Найбільш перспективним керамічним матеріалом для застосування в конструкції деталей гарячої частини ГТД є  $ZrB_2 + MoSi_2$ . Зразки цього складу пройшли запланований обсяг термоциклічних випробувань (6000 циклів) і мають лише незначне окиснення поверхні.

На ДП «Івченко-Прогрес» виконано також термоциклічні випробування керамічних конусів і сегментів, виготовлених в ІПМ НАНУ, у складі дослідних відсіків. Результати випробувань дозволяють розпочати підготовку до випробувань у складі технологічного двигуна.

Триває підготовка виробництва для виготовлення проставок соплового апарата двигуна AI-450B із заготовок, поставлених ІПМ НАНУ.

Крім того, Інститут виготовляє керамічні заготовки з базальтовими або карбідокремнієвими волокнами, призначені для виготовлення проставок соплового апарата та інших деталей гарячої частини ГТД з підвищеними механічними властивостями.

На ДП «Івченко-Прогрес» виконуються також роботи з дослідження матеріалу ВХ2К, розробленого ІПМ НАНУ, для заміни ВЖ98. Заплановано термоциклічні випробування на установці за температур не менших ніж 1300 °С.

Дуже перспективним напрямом в авіаційному двигунобудуванні є застосування підшипників з тілами кочення з керамічних матеріалів. Мала питома вага і велика твердість забезпечують працездатність підшипників (опор роторів) за вищих швидкісних параметрів.

У 2016 р. фахівці ДП «Івченко-Прогрес» та Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України узгодили основні напрями співпраці зі створення керамічних матеріалів для тіл кочення підшипників і розробили технічне завдання. У грудні 2017 р. співробітники Інституту поінформували фахівців ДП



**Рис. 3.** Виготовлені в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України дослідні зразки керамічних (з матеріалу В4С) кульок великого розміру (діаметр 42 мм) для підшипників кочення

«Івченко-Прогрес» про хід виконання першого етапу робіт:

- виконано моделювання процесу гарячого спікання керамічних матеріалів під високим тиском;

- виготовлено технологічне оснащення для спікання керамічних матеріалів на основі тугоплавких сполук для керамічних кульок;

- розроблено і виготовлено технологічне оснащення та обладнання для прецизійної механічної обробки керамічних кульок великого розміру (до 42 мм) (рис. 3);

- визначено фізико-механічні характеристики керамічних матеріалів для високонавантажених і високошвидкісних підшипників.

Зараз триває спільна робота з виготовлення комплектів тіл кочення з кераміки на основі карбіду бору (діаметр 12,7 мм) з різномірністю в комплекті 1 мкм для радіального шарикопідшипника.

Договір про науково-технічне співробітництво між Інститутом проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України та ДП «Івченко-Прогрес» охоплює такі основні напрями:

- визначення комплексу механічних характеристик нових матеріалів і розроблення розрахунково-експериментальних методів визначення можливого рівня вібраційних напружень у деталях ГТД та запобігання їх руйнуванню від втоми;

- організація і проведення разом із зацікавленими науковими та промисловими організаціями наукових конференцій «Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні»;

- взаємний обмін досвідом та науково-технічною інформацією за темою співпраці, підготовка спільних наукових статей, доповідей на конференціях, видання монографій і довідників;

- підготовка Інститутом кадрів вищої кваліфікації з числа талановитої молоді ДП «Івченко-Прогрес» і стажування фахівців підприємства в Інституті;

- ініціювання формування загальнодержавних науково-технічних програм з вирішення проблем створення конкурентоспроможних на світовому ринку вітчизняних двигунів, розроблення нормативних документів для забезпечення їх надійності.

Метою проведення спільних робіт з Інститутом проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного є розрахункове дослідження аеродинамічної стійкості до флатера робочих лопаток вентилятора двигуна Д-436-148ФМ. Було проведено чисельний аналіз аеропружної поведінки вібруючого лопаткового вінця вентилятора. Чисельний метод засновано на розв'язанні зв'язаної задачі, в якій рівняння аеродинаміки і пружних коливань лопаток інтегруються паралельно-послідовно з обміном інформацією на кожній ітерації. Потік ідеального газу через лопатковий вінець (з періодичністю на повній дузі кола) описується повною системою нестационарних рівнянь Ейлера в інтегральній формі законів збереження. Розрахунки проводяться також з урахуванням в'язкості газу. Чисельне інтегрування реалізується з використанням явної монотонної звичайно-об'ємної різницевої схеми Годунова–Колгана 2-го порядку точності, узагальненої для довільної просторової деформованої різницевої сітки. Для опису руху (коливань) лопаток використано модальний підхід з урахуванням перших п'яти власних форм коливань.

Отримано результати розрахунків аеропружних характеристик і коефіцієнтів аеродемпфірування лопаткового вінця вентилято-

ра при гармонійних і пов'язаних коливаннях за різних кутів зсуву по фазі коливань лопаток. Також розроблено і успішно використовується комплекс програм FlowER (і його розвиток F) для 2D/3D-розрахунків течій в'язкого турбулентного газу в проточних частинах турбомашин при аеродинамічному проектуванні турбін двигунів різних сімейств.

У результаті співпраці з Інститутом технічної теплофізики НАН України було розроблено, верифіковано і досліджено тривимірну модель теплового стану охолоджуваної лопатки ГТД у спряженій постановці. Розроблено методику розрахунку ефективності плівкового охолодження соплових і робочих лопаток турбін.

Результати цих робіт використовуються в програмі розрахунку плівкового охолодження лопаток газових турбін, що виконується за допомогою програми FILMCKPI, розробленої в ДП «Івченко-Прогрес», у якій реалізовано дві методики розрахунку ефективності охолодження за рядом перфорації на профільній частині пера лопатки і за плоскою щілиною — одну методику розроблено в ДП «Івченко-Прогрес», другу — в ІТТФ НАНУ.

Співробітництво з Інститутом кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України та Українською інженерно-педагогічною академією (Харків) спрямовано на побудову профілю центрального тіла сопла Лавалю. План робіт передбачає розроблення:

- математичної моделі побудови профілю центрального тіла сопла Лавалю за заданими графіками площ (у крайньому лівому і крайньому правому положеннях) і за зовнішнім контуром сопла Лавалю;

- алгоритму обчислення відповідних значень коефіцієнтів штрафних функцій для вирішення оптимізаційних задач;

- математичної моделі побудови профілю центрального тіла сопла Лавалю як задачі мінімізації квадратичної функції за наявності квадратичних обмежень для пошуку глобального екстремуму;

- комплексу програм для реалізації алгоритмів побудови профілю центрального тіла сопла Лавалю.

У результаті ми очікуємо, що час на оптимізацію форми центрального тіла сопла скоротиться більш ніж у 4 рази.

Отже, наше співробітництво з установами Національної академії наук розвивається і розширюється. Ми запрошуємо також й інших науковців Академії до співпраці з нашим підприємством, тим більше, що ми маємо потуж-

ну експериментальну базу і зацікавлені в тому, щоб впроваджувати ваші наукові розробки у виробництво. Впевнений, що разом ми зможемо забезпечити збереження міцних позицій України в галузі авіаційного газотурбобудування у світі.

Дякую за увагу!