

УДК 621.793.6

А.Ю. НЕЖВЕДІЛОВ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Е. Жуковського "ХАІ", Україна

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД

Для підвищення ресурсу газотурбінних двигунів, треба підвищити ресурс окремих деталей. Однією з таких деталей є лопатка компресора. Розглянуті причини корозії лопаток газотурбінних двигунів. Визначені основні матеріали лопаток, та двигуни на яких вони встановлені, які найбільше схильні до корозії та проаналізовані методи протидії їй. Проведений аналіз методів захисту лопаток визначив, що найбільш перспективним, в порівнянні з існуючими методами, є метод вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Визначені напрями подальших досліджень.

**Ключові слова:** ресурс, лопатки, корозія, сталь, іонне азотування.

### Вступ

На ресурс газотурбінних двигунів (ГТД) в цілому великий вплив має ресурс лопатки. Підвищити працездатність лопаток можна шляхом вдосконалення матеріалу лопаток в цілому, а також за допомогою функціональних покриттів. Одним з найбільш значущих експлуатаційних факторів, що впливають на ресурс лопаток, є корозійна стійкість [18]. Метою цієї статті, є проведення аналізу існуючих методів підвищення корозійної стійкості лопаток і визначення найбільш перспективних для подальшого дослідження і впровадження у виробництво.

### Результати проведеного аналізу

Швидкому розвитку корозії сталевих лопаток компресорів ГТД сприяють умови експлуатації: різка зміна температур на протязі короткого часу, перебування в різних кліматичних зонах та знаходження літального апарату (ЛА) на землі (корозія стояння) [1, 2]. Це істотно знижує механічні властивості конструкційного матеріалу [3, 4]: оскільки корозійні пошкодження приводять до зниження в 2...3 рази межі витривалості [5]. Підтвердженням цього [6] є руйнування від корозійного пошкодження лопатки компресора шостої ступені компресора ГТД RB 211-22В літака L-1011 на режимі максимальної потужності. Установлено [7], що внаслідок корозійного впливу на конструктивні елементи авіаційна промисловість США кожний рік витрачає 2,2 млрд. дол.

У результаті проведення капітального ремонту ГТД ЛА, виявлено що найбільший відсоток корозійного пошкодження мають сталеві лопатки двигунів Ал-21Ф-3 та ТВ2-117 (рис. 1, 2).

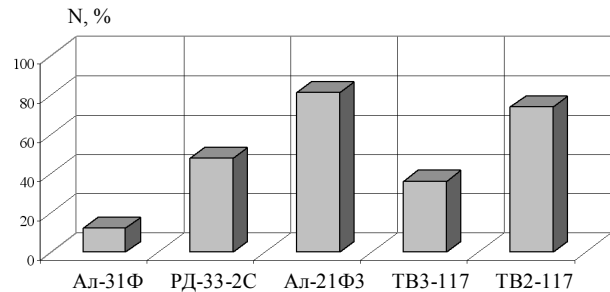


Рис. 1. Корозійне пошкодження сталевих лопаток компресора



Рис. 2. Корозійне пошкодження сталевих направляючих лопаток 11 та 12 ступеней компресора двигуна Ал-21Ф-3

Корозійна стійкість матеріалів цих лопаток визначається в основному вмістом хрому. Сталі ЕП 961-Ш, ЕП 866-Ш, що використовуються, мають більше 11% хрому. При введенні у сталь 12...15% хрому її електрохімічний потенціал стає позитивним, і вона здобуває стійкість проти корозії [8]. Ці сталі при наявності кисню повітря легко пасивуються і на їх поверхні утворюється захисна оксидна плі-

вка. Метал, що знаходиться в пасивному стані, практично не кородує. Але, підвищення вмісту хрому в сталі, як феритотворюючого елементу, для збереження міцності та технологічних властивостей сталей мартенситного класу необхідно компенсувати підвищенням вмісту аустенітотворюючого елементу: нікелю або кобальту.

Відомо [9, 10], що вміст нікелю у сталях граничний, і його подальше підвищення приведе до різкого зниження температури мартенситного перетворення, тобто, до зниження характеристик міцності сталей. Підвищити вміст хрому в сталях даного класу можливо тільки при одночасному легуванні кобальтом, який не знижує температуру мартенситного перетворення. За рахунок легування сталей кобальтом вдалося підвищити в них вміст хрому до 20% по масі. Сталі, що містять 16...20% хрому, володіють високою корозійною стійкістю. Але зміна стану поверхневих шарів, що проходить у процесі виготовлення лопатки компресора, приводить до втрати корозійної стійкості.

Серед основних видів корозійного пошкодження сталевих лопаток компресора ГТД [11] пітингова корозія є найбільш небезпечною, так як у матеріалі лопатки виникають глибокі поглиблення невеликого діаметра (близько 0,2 мм) (рис. 3). Це призводить до різкого зниження межі витривалості лопатки, а спроби вивести пітинги, зачисткою та поліруванням, вивести пітинги в багатьох випадках закінчуються браком лопаток за їх геометричними розмірами.

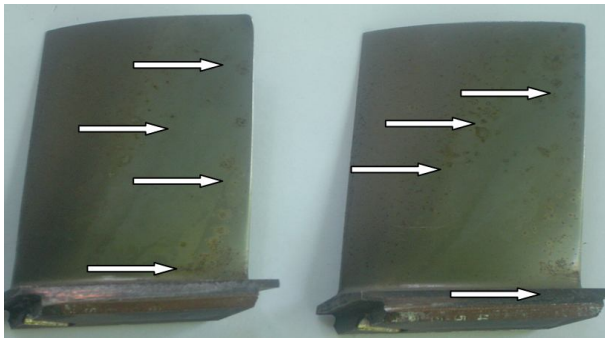


Рис. 3. Пітинги на сталевих лопатках компресора

Сталі ЕП 961-Ш, ЕП 866-Ш схильні до пітингової корозії, що є основним видом електрохімічної корозії, швидкість якої тим більша, чим агресивніше атмосфера [12]. Виникнення пітингів пов'язано з порушенням пасивного стану на окремих ділянках поверхні сталевих лопаток [13]. На цих ділянках відбувається прискорене руйнування оксидних плівок, що викликає місцеве активування – збільшення швидкості корозії та виникнення пітингів. Такими ділянками можуть бути неметалеві включення між зерен, ділянки зі зниженою концентрацією хрому у твердому розчині. Пітинги, що утворюються в ре-

зультаті корозійного пошкодження, є концентраторами напружень та можуть негативно впливати на довговічність лопаток компресора газотурбінного двигуна.

Зараз для захисту від корозії сталевих лопаток компресора використовують електролітичні нікель-кадмієві покриття, що тривало працюють при температурі 500°C та короткочасно при 600 °C. Товщина покриття  $9...15 \cdot 10^{-6}$  м (рис. 4) [10].

Проте електролітичні покриття мають ряд дуже суттєвих недоліків, що не відповідають вимогам щодо захисних покриттів. Ці проблемні питання ставлять під сумнів доцільність використання їх на сталевих лопатках компресорів ГТД, а саме тому, що:

– гальванічні покриття знижують циклічну міцність деталей, в основному через наводнення. Втрати міцності сягають 45% від початкового значення [14];

– у склад покриття входить хімічний елемент Cd, у якого невелика вільна енергія Гіббса утворення окислів CdO та низька температура плавлення. Попадаючи в камеру згоряння та на турбіну, CdO відновлюється продуктами згоряння, високореактивними матеріалами деталей газового тракту, може бути дисоційованим та викликати катастрофічне окислення й утворення тріщин на деталях гарячої частини двигуна. В даний час експериментально доведено, що на двигунах, які мають сталеві лопатки компресора з нікель-кадмієвим покриттям, окисли кадмію покривають тонким шаром лопатки соплового апарату та турбіни і викликають підвищене їх окислення [10];

– нікель-кадмієві покриття наносяться на пропільноструєну поверхню пера лопатки, підвищена шорсткість поверхні пера лопатки створює додаткову протидію повітряному потоку в компресорі та приводить до підвищення питомої втрати палива. При використанні нікель-кадмієвого покриття на двигуні питома втрата палива збільшилась на 0,84%;

– покриття має погану адгезійну та когезійну міцність зчеплення з матеріалом лопатки. При отриманні нікель-кадмієвого покриття, незважаючи на створення шорсткої поверхні, нікель до хромистої сталі має низьку адгезію. Тому в процесі ремонту лопаток є випадки відшарування нікель-кадмієвого покриття великими ділянками на поверхні лопаток.

Підвищення корозійної стійкості сталевих лопаток ГТД є сукупністю вирішення багатьох часткових проблем. Одним із напрямків їх вирішення є застосування досягнень у галузі формування зміцнених поверхневих шарів, які забезпечуються високоякісними технологіями і дозволяють із науковою обґрунтованістю та техніко-економічною цілеспрямованістю вирішувати питання на етапах створення,

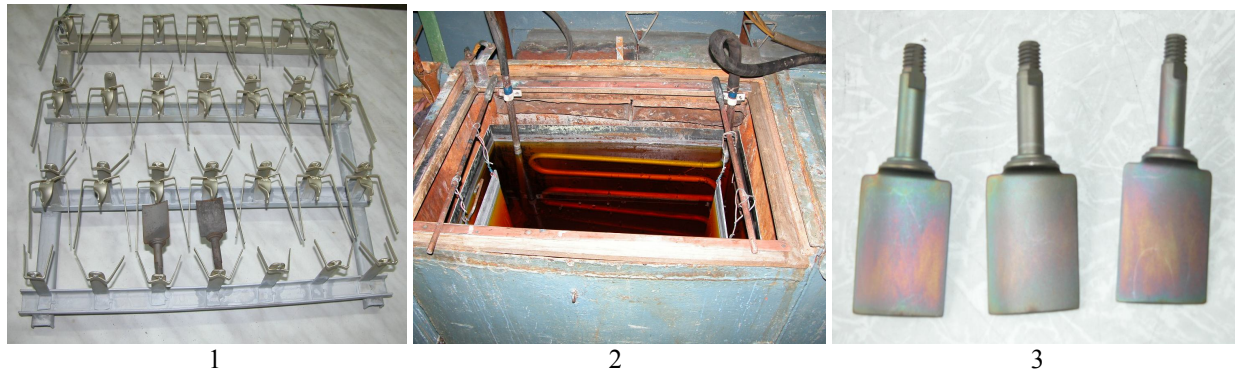


Рис. 4. Устаткування для нанесення гальванічних покриттів: 1 – утримувач лопаток компресора; 2 – гальванічна ванна; 3 – лопатки компресора з нікель-кадмієвими покриттями

відновлення та модернізації ГТД і підтримання високого рівня надійності у межах експлуатаційних режимів.

Технологічні методи зміцнення, що використовуються, необхідні, але недостатні, вони обмежені рівнем розвитку галузей техніки й технологій, які їх реалізують, ресурс зміцнених ними сталевих лопаток не відповідає сучасним технічним вимогам, а в багатьох випадках залишається низьким і потребує вдосконалення, внаслідок чого зміцнення сталевих лопаток компресора на етапі створення, відновлення і модернізації, надання їм необхідного рівня характеристик міцності та корозійної стійкості залишається важливою проблемою сучасного виробництва ГТД. У той же час, спираючись на досягнення науки, можливості виробництва, а також досвіду розвитку технологій зміцнення як на Україні так і за кордоном, є можливість підвищення властивостей шляхом застосування сучасних технологічних процесів. Одним з таких технологічних процесів, є іонне азотування. Відомо, що одним з найбільш перспективних способів низькотемпературного іонного азотування є обробка металевих матеріалів в плазмі тліючого розряду, що горить у азотованому середовищі, інколи з додаванням вуглеводню [15], зокрема, його удосконалений варіант – газотермоциклічне іонне азотування у переривистому режимі [16]. При здійсненні даного способу, завдяки використанню пульсуючого струму розряду та газотермічних циклів насичення приповерхневих шарів значно знижується час обробки, витрати електроенергії та реакційних газів, покращуються експлуатаційні характеристики деталей, оскільки завдяки низьким температурам і незначного часу дії, серцевина деталі не втрачає міцності [17].

Таким чином перспективним і універсальним технологічним процесом, призначеним для зміцнення конструктивних елементів за рахунок утворення високоякісних покриттів, є вакуумне термоциклічне азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАПТР).

## Висновки

Проведений аналіз дозволяє вважати, що найбільш перспективним для підвищення корозійної стійкості сталевих лопаток компресора ГТД є метод вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду, за умови розробки наукових основ технології його використання та відповідного обладнання які дозволять вжити його в серійному виробництві.

## Література

1. Лапаев, А.В. Статистический анализ коррозионных повреждений планера самолетов типа Ту-154 [Текст] / А.В. Лапаев, В.С. Шапкин // *Науч. вест. МГТУ ГА*. – М.: МГТУ ГА. – 2002. – № 53. – С. 22 – 26.
2. Коррозионные повреждения и защита от коррозии рабочих лопаток и дисков теплофикационных турбин [Текст] / О.А. Поваров, В.С. Соколов, А.И. Лебедева и др. // *Вестник МЭИ*. – 1997. – № 6. – С. 22 – 25, 92.
3. Шаплькин, В. Проблемы поддержания летной годности воздушных судов [Текст] / В. Шаплькин // *Авиационная промышленность*. – 2003. – № 5. – С. 24 – 26.
4. Ford, Terry. Addressing the problem [Text] / Terry Ford // *Aircraft Eng. And Aerosp. Technol.* – 2002. – Vol. 74, № 3. – P. 270 – 273.
5. Изучение влияния эксплуатационной нагрузки и коррозионной среды на выносливость лопаток компрессора ГТД [Текст] / В.Т. Троценко, А.В. Прокопенко, В.Н. Торгов, М.В. Баумштейн, Л.Б. Гецов // *Проблемы прочности*. – 1981. – № 4. – С. 5–10.
6. Rolls-Royce rotor ruptures [Text] // *Aviat. Equip. Maint.* – 1994. – Vol. 13, № 7. – С. 55.
7. Corrosion erodes aviation infrastructure [Text] // *Bus. and Commer. Aviat.* – 2002. – Vol. 91, №3. – P. 35.
8. Мельников, О.В. Ионно-плазменное азотирование деталей АТ, изготовленных из сталей и сплавов, в полном катодe [Текст] / О.В. Мельников, О.А. Гаврилюк, О.А. Галабурда // *Соверш. технол.*

процессов ремонта авиац. техн. Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации. – М., 1997. – С. 39 – 51.

9. Тихонов, Н.Д. Определение допустимого износа проточной части вертолетных ГТД, работавших в условиях запыленности воздуха [Текст] / Н.Д. Тихонов, В.В. Боковой // Газодинамика и характеристики авиадвигателей. – К.: Наука. – 1975. – С. 38 – 54.

10. Иванов Е.Г. Научно-методические материалы по защитным покрытиям лопаток компрессора ГТД [Текст] / Е.Г. Иванов. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1982. – 116 с.

11. Frazier, William E. Классификация металлических материалов и конструкций для авиакосмического применения [Текст] / William E. Frazier, Donald Polakovics, Wayne Koegel // JOM: J. Miner, Metals and Mater Soc. – 2001. – Vol. 53, №3. – P. 16–18.

12. Балицкий, О.И. Питингова корозія сталі 12Х18АГ18Ш у розчинах хлоридів [Текст] / О.И. Балицкий, О.О. Крохмальний // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – Vol. 35, № 3. – С. 81 – 85.

13. Гриценко, Е.А. Моделирование засоления проточной части ГТД [Текст] / Е.А. Гриценко, А.М. Идельсон // Техн. воздуш. флота. – Т. 70, № 1–2. – С.43–45.

14. Ляшенко, Б.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработкой и положение в Украине [Текст] / Б.А. Ляшенко, С.А. Клименко // Сучасне машинобудування. – 1999. – №1. – С. 94–104.

15. Пастух, И.М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем разряде: состояние и перспективы [Текст] / И.М. Пастух // Проблемы триболог. – 2004. – № 3. – С. 42 – 55.

16. Пат. 10014 Україна, МПК<sup>7</sup>С23С8/06. Способ поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді [Текст]: Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Мірненко В., Радько О.В.; Національна академія оборони України. – № 19782; заявл. 19.09.06; опубл. 15.12.06, Бюл. №12. – 5 с.

17. Особенности азотирования стали 30ХГСА в пульсирующем тлеющем разряде [Текст] / Б.А. Ляшенко, В.И. Мирненко, О.В. Радько, С.А. Бобыр // Вісник Черкаського національного університету. Серія „Фізико-математичні науки”. – 2007. – № 117. – С. 107 – 112.

18. Милешкин, М.Б. Оценка влияния эксплуатационных условий нагружения на долговечность лопаток ГТД [Текст] / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 118 – 122.

Надійшла до редакції 15.11.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедри інтегрованих технологій О.Я. Мовшович, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

*А.Ю. Нежведилов*

Для повышения ресурса газотурбинных двигателей, надо повысить ресурс отдельных деталей. Одной из таких деталей является лопатка компрессора. Рассмотрены причины коррозии лопаток газотурбинных двигателей. Определены основные материалы лопаток, и двигатели на которых они установлены, наиболее подверженных коррозии и проанализированы методы противодействия ей. Проведенный анализ методов защиты лопаток определил, что наиболее перспективным, по сравнению с существующими методами, является метод вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда. Определены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** ресурс, лопатки, коррозия, сталь, ионное азотирование.

## ANALYSIS OF METHODS OF INCREASE OF INOXIDIZABILITY OF STEEL SHOULDER-BLADES OF COMPRESSOR OF TURBO-ENGINE

*A. Y. Nezhvedilov*

To increase the resource of gas turbine engines, must increase the resources of individual parts. One such detail is the scoop compressor. Examined the causes corrosion of blades of gas turbine engines. The basic materials of blades and the engines on which they are established that are most prone to corrosion and analyzed methods of combating it. The analysis methods to protect blades found that the most promising in comparison with existing methods is the method of vacuum plasma nitriding Thermal cyclic pulsating glow discharge. The directions for further research.

**Key words:** resource, shoulder-blades, corrosion, steel, ionic nitriding.

**Нежведілов Артур Юсупович** – аспірант кафедри технології виробництва двигунів літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: nezhvedilov77@mail.ru.