

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОКРИТТЯ НІТРИДУ ТИТАНУ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ КОМПРЕСОРНИХ ЛОПАТОК

Стаття присвячена актуальним проблемам поломок лопаток компресорів газотурбінних двигунів внаслідок втомного характеру руйнування, ініційований ерозійними пошкодженнями зваженими частинками пилу, піску, вулканічного попелу, що знаходяться в повітрі. Основну увагу приділено визначенню впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на втомну міцність робочих лопаток компресора двигуна Д-136 як у вихідному стані, так і після ерозійного зношування. Випробування на втому проводилися на нових лопатках з покриттям і на лопатках з покриттям та без нього з ерозійним зносом пера, які пройшли випробування у складі двигуна із закиданням пилу в тракт. Закидання пилу в тракт двигуна здійснювалося під час його роботи на стенді протягом 7 циклів. Нанесення покриття нітриду титану здійснювалося методом вакуумної іонно-плазмової технології: у середовищі реактивного газу за допомогою катодної плями вакуумної дуги з подальшою конденсацією потоків газометалічної плазми на оброблювану поверхню. Випробування на втому проводилися на робочих лопатках різних ступенів компресора. Лопатки першої ступені компресора високого тиску з ерозійним зносом не випробовувалися. Випробування лопаток на втому проводилися за згинних коливань за основним тоном із симетричним циклом навантаження в умовах кімнатної температури за методом ступінчастої зміни напружень (метод «східців»). Базове число циклів навантаження становило 10^8 циклів та $2 \cdot 10^7$ циклів відповідно для титанових і лопаток із жароміцного сплаву на основі нікелю. Початковий рівень навантаження обирався для кожного ступеня окремо, виходячи з властивостей втоми. Наведено результати дослідження впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на властивості втоми робочих лопаток компресора. Визначено межі витривалості нових лопаток із покриттям та лопаток із ерозійним зносом від напрацювання, як з покриттям, так і без нього, для ймовірності неруйнування $P=0,9$.

Ключові слова: Випробування на втому, робоча лопатка компресора, покриття нітриду титану, ерозійний знос, напруження, межа витривалості.

Постановка проблеми. Газотурбінні двигуни (ГТД) під час роботи вертольота постійно зазнають впливу зважених частинок, таких як пил, пісок, вулканічний попіл, що знаходяться в повітрі та спричиняють ерозію. Цей вплив посилюється під час зльоту та посадки, особливо на непідготовлених майданчиках або під час роботи в пустелі. Потрапляння абразивних частинок у повітряний тракт спричиняє інтенсивне ерозійне зношування елементів проточної частини.

Ерозія є особливо шкідливою для компресора двигуна, оскільки це призводить до:

- зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) та помпажу;
- зменшення терміну служби;
- підвищення витрати палива;
- зниження показників надійності двигунів.

Аналіз відмов авіаційних двигунів показує, що ерозійне руйнування є однією з основних причин передчасного знімання двигунів з експлуатації [1]. Більше того, ерозійний знос є потужним концентратором напружень, що спричиняє зниження опору втомі. Згідно зі статистичними даними, до 60 % поломок лопаток компресорів ГТД мають саме втомний

характер, часто ініційований ерозійними пошкодженнями [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надійність у роботі лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) значною мірою залежить від того, наскільки їхня поверхня здатна витримувати дію високих температур у окисному середовищі [4, 5], адже саме поверхневі зони найчастіше стають осередком початку руйнування турбінних лопаток. Для захисту проточної частини та підвищення ресурсу лопаток широкого розповсюдження набули методи інженерії поверхні. Одним із головних способів підвищення їхньої стійкості до різновидів гарячої корозії є нанесення захисних покриттів, зокрема ерозійностійких [6]. Тому довговічність і надійні експлуатаційні властивості таких покриттів прямо впливають на тривалість служби елементів двигуна [7, 8].

Науковці Національного університету «Запорізька політехніка», зокрема разом із представниками АО «Мотор Січ» тривалий час працюють над створенням покриттів для лопаток ГТД. Так в роботах [9, 10] вивчено покриття, нанесені на лопатки турбін методом іонно-плазмового осадження з використанням трубних катодів сплаву Ni - Cr - Al - Y, виготовленні методами гранульної металургії та за допомогою електронно-променевого переплаву. В результаті [11] отримано патент на склад сплаву для нанесення покриття, що дозволяє одержувати рівноважну структуру та високі жароміцність та довговічність.

Серед матеріалів покриттів особливе місце займає нітрид титану (TiN), який розглядається як класичне «покриття першого покоління» для захисту від твердочастинкової ерозії. Численні дослідження підтверджують ефективність TiN покриттів, нанесених методами фізичного осадження з парової фази (PVD), зокрема вакуумно-дуговим методом. У роботі [12, 13] зазначено, що лопатки з покриттям TiN демонструють значно вищий опір ерозії порівняно з незахищеними титановими сплавами, особливо за малих кутів атаки абразивних частинок.

Авторами [14] досліджено елементний склад, механічні властивості та структуру Ti-Cr-N-покриттів, осаджених у широкому діапазоні тисків азоту з потоків нефільтрованої та фільтрованої вакуумно-дугової плазми сплавних катодів Ti-Cr, що містять 23 та 32 ваг.% Cr. Отримано наноструктурні Ti-Cr-N-покриття з високими механічними характеристиками ($H_m \sim 35$ ГПа), що містять ~ 20 ваг.% Cr, які можуть бути використані для захисту матеріалів.

В роботі [15] проведено огляд досліджень по впливу технологічних умов осадження та структурних особливостей вакуумно-дугових покриттів на основі TiN на їх стійкість до кавітаційної ерозії. Досліджено багатошарові покриття Ti-TiN з різною кількістю та співвідношенням товщини шарів, які можна використовувати для захисту титанового сплаву Ti-6Al-4V.

Однак впровадження твердих зносостійких покриттів пов'язане з ризиком зниження втомної міцності основного матеріалу. Як зазначається у дослідженнях [16], нанесення твердих покриттів може призводити до виникнення залишкових напружень розтягування на межі «покриття-основа» або ініціювати зародження втомних тріщин через крихкість самого покриття. Наприклад, експериментальні дані для титанового сплаву TC4 [17] показали, що нанесення TiN може незначно знижувати границю витривалості при випробуваннях на багатоциклову втому (з 530,5 МПа до 529,2 МПа), а використання багатошарових систем типу TiN/Ti може призвести до ще більшого падіння втомних характеристик.

Водночас інші джерела [18] вказують на можливість збереження або навіть підвищення втомної міцності за рахунок оптимізації технології нанесення, створення сприятливих напружень стиснення у поверхневому шарі та використання наноструктурних композицій. Українські вчені також активно розвивають цей напрям, пропонуючи багатошарові покриття (наприклад, системи «Авініт»), які поєднують високу твердість із тріщиностійкістю [19].

Незважаючи на значний обсяг досліджень, питання сумісного впливу ерозійного зносу та наявності покриття TiN на втому лопаток залишається недостатньо вивченим. Більшість

праць зосереджені або окремо на ерозійній стійкості, або на втомній міцності нових лопаток без урахування їх деградації в процесі експлуатації.

З огляду на актуальність проблеми, метою цієї роботи є визначення впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на втомну міцність робочих лопаток компресора двигуна Д-136 як у вихідному стані, так і після ерозійного зношування.

Мета досліджень. Метою цієї роботи є визначення впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на втомну міцність робочих лопаток компресора двигуна Д-136 як у вихідному стані, так і після ерозійного зношування.

Основний матеріал дослідження. Випробування на втому проводилися на нових лопатках з покриттям і на лопатках з покриттям та без нього з ерозійним зносом пера, які пройшли випробування у складі двигуна із закиданням пилу в тракт. Закидання пилу в тракт двигуна здійснювалося під час його роботи на стенді протягом 7 циклів. Загальна маса пилу склала 57,2 кг.

Нанесення покриття нітриду титану здійснювалося методом вакуумної іонно-плазмової технології: у середовищі реактивного газу за допомогою катодної плями вакуумної дуги з подальшою конденсацією потоків газометалічної плазми на оброблювану поверхню.

Випробування на втому проводилися на робочих лопатках різних ступенів компресора. Дані щодо робочих лопаток компресора низького тиску (КНТ) та компресора високого тиску (КВТ) наведено в таблиці 1. Лопатки 1-го ступеня КВТ з ерозійним зносом (з покриттям і без покриття) не випробовувалися.

Таблиця 1 – Матеріал лопаток досліджуваних ступенів компресора

Ступінь компресора	Матеріал лопатки	σ_{-1} , кгс/мм ²
6 ступінь КНТ	ВТЗ-1	≥40
1 та 5 ступені КВТ	ВТ8	
7 ступінь КВТ	ХН77ТЮР	≥31

Для контролю рівня динамічних напружень під час випробувань на втому лопатки препарували дрітряними тензорезисторами з базою 5 мм відповідно до схеми, наведеної на рисунку 1. Розміри розміщення контрольного тензорезистора наведено в таблиці 2.

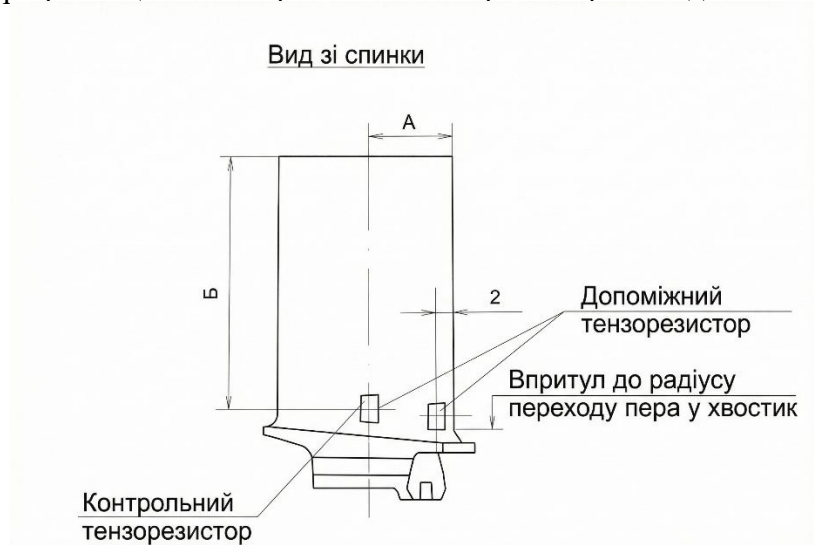


Рисунок 1 – Схема препарування лопаток для випробувань на втому

Таблиця 2 – Розміри для препарування контрольного тензорезистора

Ступінь компресора	А, мм	Б, мм
6 ступінь КНТ	9	41
1 ступінь КВТ	9	39,5
5 ступінь КВТ	7,5	19
7 ступінь КВТ	6,5	16

Випробування лопаток на втому проводилися за згинних коливань за основним тоном (перша згинна форма) із симетричним циклом навантаження в умовах кімнатної температури за методом ступінчастої зміни напружень (метод «східців»).

Базове число циклів навантаження становило:

– для титанових лопаток – $N = 10^8$ циклів;

– для лопаток із жароміцного сплаву на основі нікелю – $N = 2 \cdot 10^7$ циклів.

Початковий рівень навантаження обирався для кожного ступеня окремо, виходячи з властивостей втоми.

Обробку результатів випробувань та обчислення значень середньої межі витривалості $\bar{\sigma}_{-1}$ і її середньоквадратичного відхилення $S_{\sigma_{-1}}$ виконано за формулами:

$$\bar{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + d \left(\frac{A}{R} - 0,5 \right), \quad (1)$$

$$S_{\sigma_{-1}} = 1,62 \cdot d \cdot \left(\frac{R \cdot B - A^2}{R^2} + 0,029 \right), \quad (2)$$

де σ_0 – нижній рівень навантаження на діаграмі втоми, на якому немає руйнувань;

R – загальна кількість руйнувань лопаток у партії $R = \sum_{i=0}^n r_i$;

$A = \sum_{i=0}^n r_i \cdot i$; $B = \sum_{i=0}^n r_i \cdot i^2$;

r_i – кількість руйнувань на i -му рівні навантаження;

i – номер рівня ($i = 0; 1; 2 \dots n$);

d – крок зміни напружень між рівнями навантаження.

Межі витривалості, отримані під час випробувань досліджуваних лопаток для ймовірності неруйнування $P = 0,5$, були перераховані на ймовірність неруйнування $P = 0,9$ за формулою:

$$\sigma_{-1(P=0,9)} = \bar{\sigma}_{-1(P=0,5)} - z_{P1} \cdot S_{\sigma_{-1}}, \quad (3)$$

де z_{P1} – квантиль нормального ймовірнісного розподілу для $P = 0,9$; $z_{P1} = 1,2815$.

Результати математичної обробки результатів цих випробувань для лопаток 6-го ступеня КНТ наведено на рисунку 2.

Ремонт та відновлення деталей машин

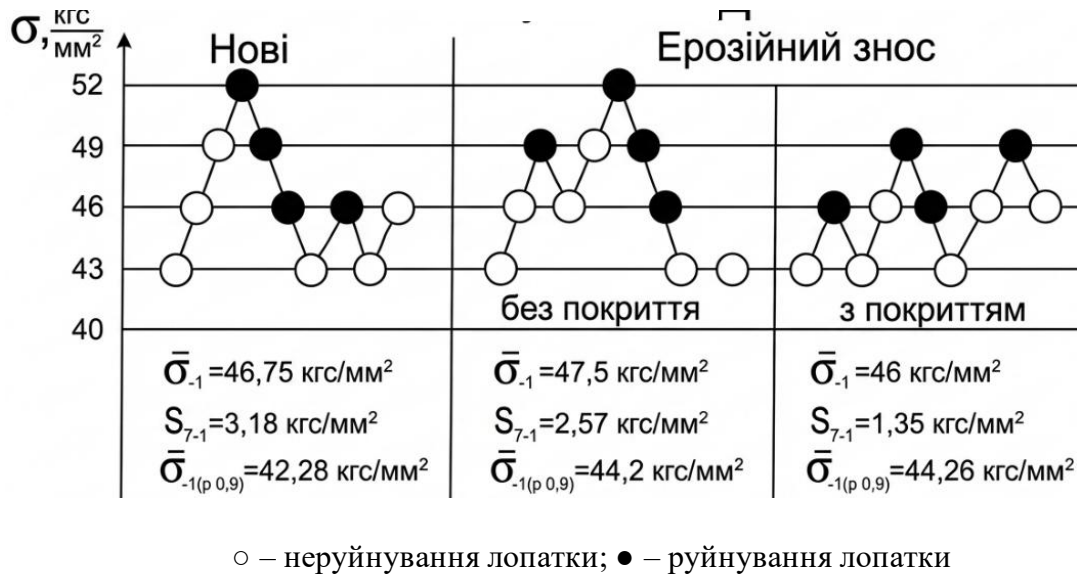


Рисунок 2 – Діаграми «східці» за результатами випробувань на втому лопаток 6-го ступеня КНТ

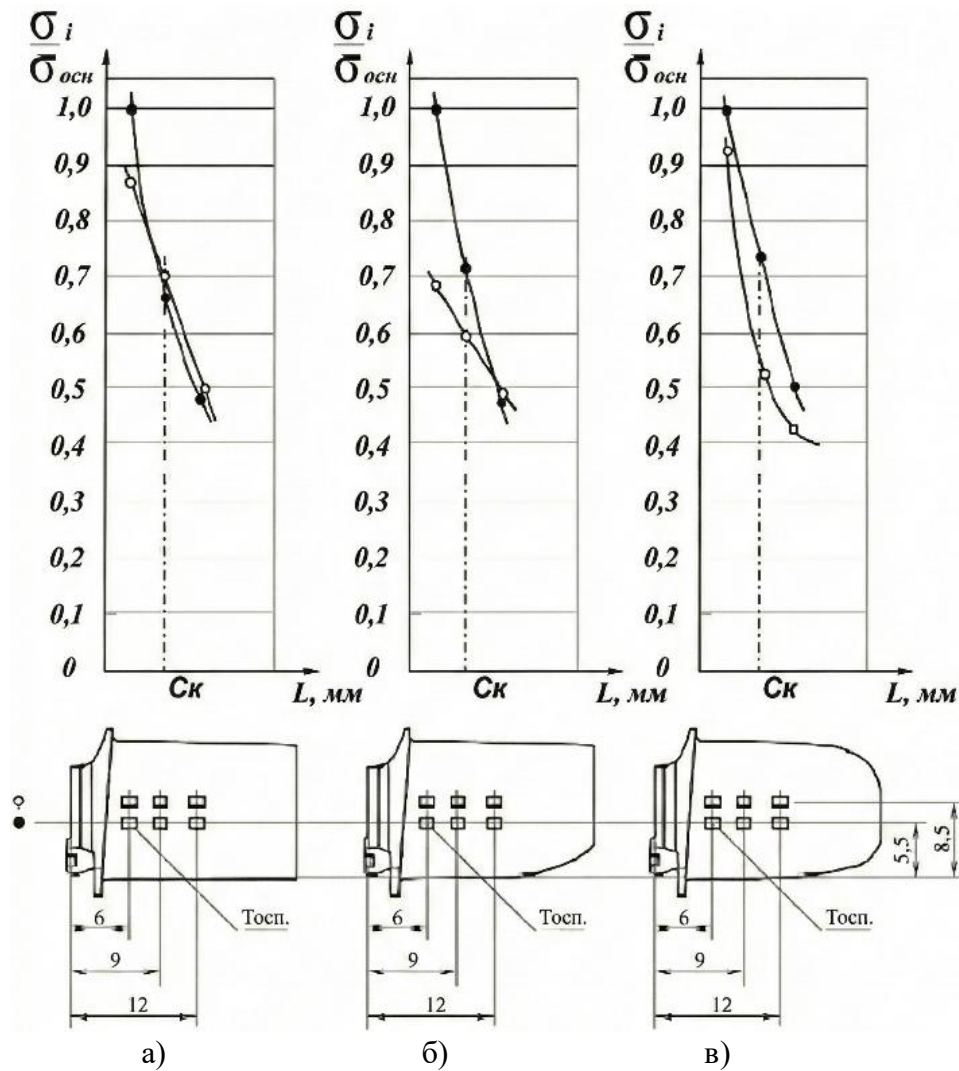
Аналіз результатів випробувань нових лопаток усіх досліджених ступенів показує, що нанесення даного покриття практично не впливає на їхні властивості втомі, оскільки отримані межі витривалості не нижчі за необхідні значення.

Значення меж витривалості нових лопаток із покриттям та лопаток із ерозійним зносом від напрацювання (з покриттям та без покриття) для ймовірності неруйнування $P = 0,9$ за результатами випробувань наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Межі витривалості досліджуваних лопаток

Ступінь компресора	Межі витривалості лопаток σ_{-1} , кгс/мм ²		
	нових з покриттям	з покриттям і ерозійним зносом від напрацювання	без покриття і ерозійним зносом від напрацювання
6 ступінь КНТ	42,28	44,26	44,2
1 ступінь КВТ	42,72	—	—
5 ступінь КВТ	41,26	42,28	42,9
7 ступінь КВТ	36,4	25,92	16,6

Ремонт та відновлення деталей машин



Т_{осп.} – основний тензорезистор;
С_к – переріз для контролю напружень під час випробування

Рисунок 3 – Розподіл напружень для лопаток 7-го ступені КВТ: а) – нових; б) – з напрацюванням та покриттям; в) – з напрацюванням без покриття

Аналіз результатів випробувань лопаток з ерозійним зносом показує, що дане покриття не знижує властивості втоми пера лопаток порівняно з лопатками без покриття.

Зниження властивостей втоми лопаток 7-го ступеня КВТ з ерозійним зносом нижче необхідних значень пояснюється значною чутливістю матеріалу лопаток до концентрації напружень (чутливість до надрізу), тобто є наслідком появи на пері лопаток внаслідок зносу від випробувань великої кількості рисок-концентраторів.

Визначення чутливості до надрізу, проведене на круглих штампованих зразках (гладких та з надрізом радіусом $r_n = 0,75$ мм), показало за бази випробувань $N = 2 \times 10^7$ циклів такі межі витривалості:

- σ_{-1} (гладких) = 34 кгс/мм²;
- σ_{-1} (надріз) = 20 кгс/мм².

При теоретичному коефіцієнті концентрації напружень $\alpha_\sigma = 1,89$ ефективний коефіцієнт концентрації напружень склав $K_\sigma = 1,7$, а коефіцієнт чутливості до надрізу

Ремонт та відновлення деталей машин

$q = 0,785$, що підтверджує високу чутливість матеріалу ХН77ТЮР (лопатки 7-го ступеня КВТ) до концентрації напружень [20].

Для виявлення можливого перерозподілу напружень (внаслідок зміни геометрії пера лопаток від ерозійного зносу) від місця, де вони задаються і контролюються, до місця руйнування лопаток (радіус переходу пера у хвостик), було проведено дослідження розподілу напружень на лопатках 7-го ступеня КВТ за допомогою тензорезисторів з базою 1 мм (рис. 3).

Дослідження розподілу напружень на нових лопатках та лопатках з ерозійним зносом не виявило перерозподілу напружень, здатного вплинути на точність задання напружень, що підтверджує зниження властивостей втоми внаслідок впливу концентрації напружень.

Загальний аналіз результатів випробувань показує, що нанесення на перо лопаток покриття нітриду титану не погіршує їхніх властивостей втоми, визначених під час випробування за першою згинною формою коливань.

ВИСНОВКИ

1. Нанесення ерозійностійкого покриття нітриду титану на перо лопаток 6-го ступеня КНТ, а також 1-го, 5-го та 7-го ступенів КВТ двигуна Д-136 не погіршує властивостей втоми нових лопаток. Межі витривалості лопаток зазначених ступенів, визначені під час випробувань за першою згинною формою коливань, відповідають вимогам.

2. Випробування на втому лопаток із покриттям нітриду титану та ерозійним зносом пера, отриманим внаслідок закидання пилу в тракт двигуна Д-136 під час його роботи на стенді, засвідчили захисну роль покриття.

Список використаних джерел

1. *Hamed A. Erosion and Deposition in Turbomachinery / A. Hamed, W. Tabakoff, R. Wenglarz // Journal of Propulsion and Power. – 2006. – Vol. 22, No. 2. – P. 350–360.*
2. Конструкція авіаційних двигунів : підручник / [В. В. Панін, Ю. М. Терещенко, І. О. Логвіненко та ін.] ; за ред. В. В. Паніна. – Київ : НАУ, 2012. – 420 с.
3. *Терещенко Ю.М. Теорія теплових двигунів. Двигуни силових установок безпілотних літальних апаратів / Ю.М. Терещенко, М.М. Мітрахович, В.О. Богуслаєв, І.Ф. Кравченко, Ю.Ю. // Навчальний посібник. — Запоріжжя: Мотор Січ, 2021. — 206 с.*
4. *Nicholls J.R. Advances in coating design for high performance gas turbines / J.R. Nicholls // MRS Bull. 2003. №28. P. 659-670.*
5. *Nicholls J.R. Designing oxidation-resistant coatings / J.R. Nicholls // JOM-J. Min. Met. Mat. S. 2000. №52. P. 28-35.*
6. *Alqallaf, J.; Ali, N.; Teixeira, J.A.; Addali, A. Solid Particle Erosion Behaviour and Protective Coatings for Gas Turbine Compressor Blades—A Review. Processes 2020, 8, 984. <https://doi.org/10.3390/pr8080984>*
7. *Bose S. High Temperature Coatings / S. Bose // Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007. - 299 p.*
8. *Reed R.C. The Superalloys Fundamentals and Applications / R.C. Reed // Cambridge, New York, 2006. 363 p.*
9. *Єфанов В. С. Вплив технології виготовлення випаровуваних катодів на якість іонно-плазмових покриттів лопаток турбін / В. С. Єфанов, О. О. Педаш, І. А. Петрик, В. В. Клочихин, Р. Ю. Фетісов, Г. М. Лантєва // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2021. - № 6. - С. 31–38. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2021_6_6*
10. *Yefanov V.S. Electrolyte-plasma processing of turbine blades for heat-resistant coating*

removal / V.S. Yefanov, A.V. Ovchinnikov, I.A. Petrik, A.A. Mylenko // Технологические системы. 2018. №2. С. 59-65.

11. Склад сплаву для нанесення покриття Пат. 124695 UA, МПК C22C 19/05, C23C 30/00, C23C 14/14. / Овчинников О. В.; Єфанов В. С. Капустян О. Є. № u202005296; заявл. 17.08.2020; опубл. 27.10.2021, Бюл. № 43

12. Tabakoff W. Surface protection from erosion in turbomachinery / W. Tabakoff // Wear. – 1995. – Vol. 186-187, Part 1. – P. 224–229.

13. Alqallaf, J.; Teixeira, J.A. Quantifying the Economic Benefits of Using Erosion Protective Coatings in a Low-Pressure Compressor (Aero-Engine): A Case Study Evaluation. / J. Alqallaf, J.A. Teixeira // Processes 2022, 10, 385. <https://doi.org/10.3390/pr10020385>

14. Zadneprovskiy Yu A. Mechanical characteristics and structure of vacuum arc Ti-Cr-N coatings [Електронний ресурс] / Yu A. Zadneprovskiy, V.A. Bilous, V.S. Goltvyanytsya, E.N. Reshetnyak, A.A. Komar // Problems of Atomic Science and Technology. – 2025. – С. 114–121. – Режим доступу: <https://doi.org/10.46813/2025-156-114>.

15. Klimenko I. O. Cavitation erosion resistance of vacuum-arc coatings based on TiN / I. O. Klimenko, V. G. Marinin, V. A. Belous, N. A. Azarenkov, M. G. Ishchenko, V. S. Goltvyanytsya, A. S. Kuprin // Problems of Atomic Science and Technology 2023. – 147(5). – 126-136 DOI: 10.46813/2023-147-126

16. Baragetti S. Fatigue behavior and FEM modeling of thin-coated components/ S. Baragetti, G.M. La Vecchia, A. Terranova // International Journal of Fatigue. 2003. – Volume 25, Issues 9–11, – p. 1229-1238. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.08.009>

17. Cao Z. Effect of anti-erosion coatings on fatigue performance of titanium alloys in compressor blades / Z. Cao, Y. Chai, G. He, Z. Zhang, P. Li, X. Zha // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(19): 429930. <https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2024.29930>.

18. Соболев, О. В. The laws of structure formation in vacuum-arc deposition multilayer TiN-MoN nanostructured coatings / О. В. Соболев, А. А. Андреев, С. Н., Горбань, В. Ф., В. А. Столбовой, И. В. Сердюк, В. Е. Фильчиков // Eastern- Григорьев European Journal of Enterprise Technologies, 2012. - 6(5(54), 4–9. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.2270>.

19. Sagalovych O. Vacuum plasma erosion resistant 2D nanocomposite coating Avinit for compressor blades of gas turbine engines of aircraft engines / O. Sagalovych, V. Popov, O. Kononyhin, V. Sagalovych, S. Dudnik, and O. Prokopenko // Mech. Adv. Technol., 2023. - vol. 7, no. 1 (97), pp. 7–15. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.264788>

20. Попович В. В. Матеріалознавство : підручник / В. В. Попович. – Львів : Світ, 2018. – 592 с.

Babenko O. M., Kapustian O.Ye.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TITANIUM NITRIDE COATING ON THE FATIGUE STRENGTH OF COMPRESSOR BLADES

The article is devoted to the current problems of failures of compressor blades of gas turbine engines due to the fatigue nature of the destruction, initiated by erosion damage by suspended particles of dust, sand, volcanic ash in the air. The main attention is paid to determining the influence of erosion-resistant titanium nitride coating on the fatigue strength of the working blades of the compressor of the D-136 engine both in the initial state and after erosion wear. Fatigue tests were carried out on new blades with a coating and on blades with and without a coating with erosion wear of the feather, which were tested as part of the engine with dust thrown into the tract. Dust was thrown into the engine tract during its operation on the stand for 7 cycles. The titanium nitride coating was applied by vacuum ion-plasma technology: in a reactive gas environment using a cathode spot of a

vacuum arc with subsequent condensation of gas-metal plasma flows on the treated surface. Fatigue tests were performed on the blades of different stages of the compressor. The blades of the first stage of the high-pressure compressor with erosive wear were not tested. Fatigue tests of the blades were performed under bending vibrations according to the fundamental tone with a symmetric loading cycle at room temperature using the step stress method (the “step” method). The basic number of loading cycles was 108 cycles and $2 \cdot 10^7$ cycles, respectively, for titanium and nickel-based heat-resistant alloy blades. The initial load level was selected for each stage separately, based on the fatigue properties. The results of the study of the influence of the erosion-resistant titanium nitride coating on the fatigue properties of the compressor blades are presented. The endurance limits of new blades with coating and blades with an erosive wear after operating with and without coating for probability of non-destruction $P = 0,9$ were determined.

Keywords: *Fatigue tests, compressor working blade, titanium nitride coating, erosive wear, tension, endurance limit.*

Стаття надійшла 11.12.2025 р.