На основі проведених досліджень розроблено модель процесу обробки поверхонь кромок деталей вільним абразивом у псевдозрідженому стані із застосуванням повітряних струменів, що дозволило отримати основні закономірності для визначення параметрів процесу та встановити його ключові технологічні характеристики відповідно до запропонованої моделі.

Список посилань

1. Агишев Б. М., Елашов А. А., Моисеенко Н. В. Применение методов поверхностного пластического деформирования для повышения усталостной прочности дисков компрессора авиационных ГТД. *Проблемы прочности.* 1977. № 3. С. 114–116.

2. Качан О. Я., Уланов С. О. Встановлення закономірностей обробки дисків в псевдозрідженому шарі абразиву. *Космічна наука і технологія*. 2023. Т. 29. № 6. С. 62-67. https://doi.org/10.15407/knit2023.06.062

3. Качан О. Я., Уланов С. О. Підвищення довговічності зварних барабанів роторів компресорів обробкою в псевдозрідженому шарі абразиву // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2022. – № 1. – С. 53–57. https://doi.org/10.15588/1607-6885-2022-1-7

4. Качан О. Я., Уланов С. О. Модель процесу обробки кромок деталей авіакосмічної техніки вільним абразивом із застосуванням повітряних струменів. *Космічна наука і технологія*. 2024. Т. 30. № 5. С. 29–35. https://doi.org/10.15407/knit2024.05.029

УДК 621.438.4

Омельченко Ю.В., аспірант
Уланов С.О., PhD, доцент
Національний університет «Запорізька політехніка», yuomelch45@gmail.com

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ЛОПАТОК ГТД

Сучасні робочі лопатки є одними з найбільш високонавантажених деталей газотурбінних двигунів (ГТД). Вони функціонують у надзвичайно складних експлуатаційних умовах. Це високі температури та циклічні термомеханічні навантаження, які супроводжуються інтенсивною газовою корозією. Окрім цього, матеріал отримує значний вплив природніх абразивів (пісок, пил і т. д). Такі фактори впливу зумовлюють прискорену деградацію поверхневих шарів матеріалу. З'являється втомне руйнування деталі та ерозійний знос. Також часто можна спостерігати ефект кавітаційного пошкодження пера лопатки.

В сучасних умовах експлуатації повітряних суден, пріоритетним завданням є мінімізація експлуатаційних витрат та підвищення ресурсу експлуатації ГТД без радикальної зміни його конструкції та без заміни базових сплавів. Таку задачу можна вирішити шляхом збільшення показників втомної міцності та зносостійкості критичних деталей ГТД через використання технологічних методів зміцнюючої поверхневої обробки матеріалу цих деталей.

Метою даної роботи є систематичний аналіз ефективності окремих технологій поверхневого зміцнення та дослідження синергетичного ефекту, що виникає при їх комплексному застосуванні, для досягнення максимального приросту ресурсу авіаційних деталей.

Аналіз окремих методів зміцнення.

Сучасний арсенал методів фінішної обробки дозволяє цілеспрямовано впливати на фізико-механічні властивості поверхні.

На основі аналізу ефективності використання 13 найпоширеніших методів поверхневої зміцнювальної обробки було визначено найбільш практичні та економічно обґрунтовані:

1. Механічне зміцнення (LSP). Лазерно-ударна обробка (Laser Shock Peening) змінення створюється через дію мікровибухової плазмової хвилі, ініційованої лазерним імпульсом.

Зміцнений шар — від 1.0 до 1.2 мм. Це запобігає розвитку втомних мікротріщин, збільшує загальний ресурс деталі до 150% [2].

2. Гаряче ізостатичне пресування (HIP). Метод термічної обробки. При високих температурах відбувається об'ємне ущільнення матеріалу, що призводить до зростання ресурсу до 90% [5, 6].

3. Хіміко-термічна та іонно-плазмова обробка. Іонно-плазмове азотування дозволяє формувати на поверхні нітридні фази високої твердості (до 1200 HV), що підвищує ресурс на 50–80% [3]. Борування титанових сплавів підвищує ресурс 80–150% [4].

Для захисту від високотемпературної ерозії застосовуються PVD-покриття (TiN, AlTiN). Вони створюють хімічно інертний та зносостійкий бар'єрний шар [1].

Дослідження синергетичного ефекту комплексних методів.

Ключовим об'єктом дослідження був синергетичний ефект комплексного застосування вказаних технологій при переході від одиничного застосування. Такий підхід забезпечує кратне зростання експлуатаційних характеристик.

LSP + PVD + азотування. Дана трикомпонентна схема є найбільш результативною. Забезпечує рекордний приріст ресурсу на рівні 400–500%. Механізм синергії реалізується через створення багаторівневої зміцненої структури із захистом від ерозії.

LSP + азотування. Поєднання механічного наклепу та дифузійного насичення азотом дозволяє підвищити ресурс до 300%. Радикально підвищує опір втомному руйнуванню в умовах високочастотних вібрацій.

HIP + азотування. Забезпечує підвищення ресурсу до 250%.

HIP + термомеханічне старіння (TMC). Підхід гарантує приріст ресурсу до 250% при глибині зміцненого шару 0.8–1.5 мм.

Проведений аналіз встановив, що інтеграція комплексних методів обробки є найбільш перспективним шляхом модернізації виробництва ГТД.

Найбільш ефективними комбінаціями визнано LSP + азотування, LSP + PVD + азотування та HIP + азотування.

Застосування трикомпонентної обробки (LSP + PVD + азотування) дозволяє досягти синергетичного ефекту з приростом ресурсу деталей на рівні 400–500%.

Комплексне зміцнення забезпечує радикальне покращення характеристик лопаток без втручання в їхню геометрію.

Список посилань

1. Clauer A. H. Laser shock peening for fatigue resistance / Clauer A. H. // Surface Performance of Titanium. – 1996. – P. 217–230. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/237562436_Laser_shock_peening_for_fatigue_resistance

2. Fatigue fracture behavior of Ti6Al4V PVD coated / Pitanga M., Cioffi M. O. H., Venditti M. L. R., Woorwald H. // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2. – P. 1859–1864. [Електронний ресурс] – Режим доступу: DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.200

3. Bhavsar V. Characterization of Ti–6Al–4V alloy modified by plasma nitriding process / Bhavsar V., Jhala G., Shankar J. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/322386952

4. Kaouka A. Characterization and properties of boriding titanium alloy Ti6Al4V / Kaouka A., Benarous K. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/341320762_Characterization_and_Properties_of_Boriding_Titanium_Alloy_Ti6Al4V

5. Fatigue characterization of titanium Ti–6Al–4V samples produced by additive manufacturing / Chastand V., Tezenas A., Cadoret Y. et al. // Materials Today: Proceedings. – 2016. – Vol. 3, № 10. – P. 4270–4279. DOI: 10.1016/j.matpr.2016.02.336.

6. Качан О. Я., Уланов С. О. Підвищення довговічності зварних барабанів роторів компресорів обробкою в псевдозрідженому шарі абразиву // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2022. – № 1. – С. 53–57. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-1-7.