УДК 621.438.4:621.793.7+620.179.1

Омельченко Ю.В., аспірант
Качан О.Я., PhD (Philology), докт. техн. наук, професор
Національний університет «Запорізька політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Сучасні газотурбінні двигуни (ГТД) працюють в умовах підвищених температур. Змінні механічні і вібраційні навантаження, циклічні навантаження разом із сприянням підвищеної температури, особливо сильно впливають на ресурс лопаток компресора. Основними типами руйнування цих елементів є втомне руйнування, ерозія та накопичення мікропошкоджень у поверхневому шарі. В умовах необхідності підвищення економічної ефективності перевезень, значного зниження об’ємів викидів шкідливих продуктів горіння в атмосферу, суттєво зростають вимоги до надійності та продовження терміну служби ГТД без збільшення ваги, вартості та складності конструкції, екологічної чистоти та економічності.

Мета роботи: обґрунтувати ефективність методів поверхневого зміцнення на основі пластичної деформації для підвищення ресурсу лопаток компресора ГТД.

Існує кілька підходів до вирішення цієї задачі: використання жароміцних сплавів, зміна форми деталей, нанесення захисних покриттів або застосування поверхневого зміцнення. Якщо роздивлятись рішення з точки зору відношення «ефективність-вартість», найбільш оптимальними серед них є методи поверхневого зміцнення на основі поверхневої пластичної деформації (ППД). При порівнюванні цих методів, наприклад, з нанесенням покриттів, методи ППД мають певну очевидну перевагу:

1. створюють надійний монолітний шар, який міцно зв’язаний з основним матеріалом.
2. Такі методи можна застосовувати до вже освоєних матеріалів без зміни виробничих процесів.
3. Вони дозволяють обробляти деталі точково, в зонах конкретних підвищених навантажень.
4. Можуть застосовуватися навіть якщо деталі мають складну форму, як, наприклад, лопатки компресора. Це робить їх особливо актуальними для модернізації та ремонту авіадвигунів.

Серед усіх способів зміцнення варто звернути увагу на методи керованої пластичної деформації поверхні. Нижче наведений аналіз їхніх переваг і результатів застосування.

1. Поверхнева пластична деформація – цей спосіб один з найефективніших для зміцнення лопаток. Формується зміцнений поверхневий шар зі стиснутими залишковими напруженнями. Це підвищує втомну міцність і зносостійкість. (Обґрунтовано в [2], підтверджено експериментально в [1, 3]).
2. Алмазне згладжування, як метод ППД зменшує шорсткість поверхні, утворює напруження стиску і покращує структуру верхнього шару деталі. Моделювання в ANSYS підтверджує точність розрахунків напружень і глибини зміцнення [1].
3. Ультразвукове зміцнення та його комбінації. Цей метод має особливо гарну ефективність при комплексному використанні з іншими типами обробки: використання сталевих або скляних мікрошариків. Особливо хороший ефект для тонкостінних лопаток і деталей складної аеродинамічної форми. Найкращі результати можна досягти при використанні тороїдальних або "стакан"-подібних концентраторів [2].
4. Комбіноване зміцнення дає кращий ефект, ніж окремі методи, але є більш складним з точки зору необхідності точного підбору режимів обробки: часу, маси і діаметра

частинок, частоти коливань. Якщо параметри не підібрані точно, можливе виникнення перенаклепування. Такий процес призводить до появи внутрішніх напружень розтягу і зниження ресурсу [2].

5. Холодне вальцювання пера лопатки також дозволяє збільшити її довговічність, особливо при циклічних та при змінних навантаженнях. При цьому, дуже важливо правильно підібрати термічну обробку. Для забезпечення оптимальних властивостей матеріалу після вальцювання, необхідно використовувати тільки комбінацію з пониженням температури гарту і подвійним старінням [3].
6. Метод ультразвукового прокочування поверхні (USRP) значно покращує мікротвердість, індукує стискаючі залишкові напруження та зменшує шорсткість поверхні, що безпосередньо підвищує опір втомі матеріалу [4] .

Висновки: методи ППД дійсно є ефективними для технологічного подовження ресурсу лопаток компресора ГТД. При цьому, використання окремих методів не дає найкращого ефекту. Найефективнішим підходом є поєднання кількох технологічних методів поверхневого зміцнення з грамотно підібраною термічною обробкою. Наприклад, високошвидкісне фрезерування з ультразвуковим зміцненням і подальшою обробкою скляними мікрошариками та завершальним низькотемпературним старінням. Такий приклад комбінації методів зменшує шорсткість, покращує структуру поверхні, значно збільшує втомну міцність.

Однак, обмеження використання ППД методів теж існують. Перше – перенаклеп поверхні, який може викликати внутрішні напруження і зниження пластичності. Особливо це стосується тонкостінних елементів. Друге – надмірне зміцнення може спричинити утворення тріщин при циклічному навантаженні. Геометричні обмеження також існують. Виходячи з цього, перед впровадженням технології обробки потрібно проводити попереднє моделювання напруженого стану з оптимізацією параметрів зміцнення. Важливо враховувати умови експлуатації та геометрію деталі.

Список посилань

1. Тітов А. В., Мозговий С. В., Качан А. Я. Моделювання процесу алмазного вигладжування з використанням системи ANSYS. – Вісник двигунобудування, №4, 2006. – с. 90–96.

2. Качан А. Я., Богуслаєв А. В., Павленко Д. В., Мозговий С. В. Оздоблювально-зміцнюючі технології обробки лопаток моноколіс сучасних газотурбінних двигунів. – Вісник двигунобудування, №1. – 2010. – с. 82–83.

3. Кресанов Ю. С., Качан А. Я., Павленко Д. В., Уланов С. А. Вплив холодного деформування і термічної обробки жароміцного сплаву на експлуатаційні властивості лопаток компресора ГТД. – Вісник двигунобудування, №1. – 2014. – с. 60–63.

4. Liu Y. et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on the fretting fatigue behavior of GH4169 superalloy. // Engineering Failure Analysis, 2020. Посилання: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112319304773. Доступ 22.04.2025 - Дата з монітору.