

УДК 621.438

- Качан О. Я. д-р техн. наук, зав. кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: opt.ugt@motorsich.com
- Уланов С. О. канд. техн. наук, асистент кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: opt.ugt@motorsich.com

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ БАРАБАНИВ РОТОРІВ КОМПРЕСОРІВ ОБРОБКОЮ В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ АБРАЗИВУ

Мета роботи. Підвищення довговічності роторів компресорів ГТД обробкою в псевдозрідженому шарі абразиву.

Методи дослідження. Дослідження проводилися на зварених барабанах роторів компресора високого тиску (КВТ) авіаційного двигуна Д-36. Барабани оброблялися у псевдозрідженому шарі абразиву (ПША) установи АПС-600 без сопел та із застосуванням спеціальних повітряних сопел.

Зразки для випробувань на довговічність вирізалися з дисків I і IV ступенів КВТ після виконання різних варіантів їхньої обробки.

Випробування на довговічність зразків, вирізаних з диска IV ступеня КВТ, проводилося на машині УМЭ-1 ТМ при $T = 400$ °С.

Випробування на довговічність зразків, вирізаних з диска I ступеня КВТ, проводилося на машині ЭДЦ-20 при $T = 20$ °С.

Отримані результати. Установлено, що середня циклічна довговічність титанових зразків із сплаву ВТ-9, оброблених у ПША у складі барабана із застосуванням повітряних сопел в 2,2 рази більше, ніж середня циклічна довговічність зразків, оброблених у ПША без застосування сопел, при температурі випробувань $T = 400$ °С.

При обробці барабана ротора КВТ у ПША із застосуванням сопел забезпечується більш якісна обробка по дну паза і у кутах його торців.

Низькотемпературний відпал барабана при $T = 550$ °С є більш крацим, ніж при $T = 750$ °С, тому що циклічна довговічність зразків, відпалених при $T = 550$ °С, децю більша.

Відпал при $T = 750$ °С повністю знімає ефект зміцнення, отриманий при обробці у ПША.

Повторна обробка диска у складі барабана методом ПША відновлює його довговічність до вихідного стану.

Наукова новизна. Показано, що обробка зварених барабанів роторів компресорів у ПША із застосуванням спеціальних повітряних сопел підвищує якість обробки і циклічну довговічність у порівнянні з обробкою без повітряних сопел.

Встановлено температуру відпалу барабана ротора компресора, що забезпечує більш високу середню циклічну довговічність.

Практична цінність. Запропоновано технологічну схему і відпрацьовано режими обробки зварних барабанів КВТ авіаційного двигуна Д-36 у ПША із застосуванням спеціальних повітряних сопел, що забезпечують підвищення довговічності в 2,2 рази у порівнянні із обробкою без сопел.

Ключові слова: диск, барабан ротора компресора, повітряні сопла, псевдозріджений шар абразиву, циклічна довговічність.

Вступ

Одним із важливих напрямів підвищення експлуатаційних характеристик роторів компресора ТРДД є розробка та впровадження у виробництво прогресивних технологічних методів, що забезпечують високу якість їх виготовлення.

Тому підвищення ресурсу деталей ротора компресора технологічними методами є актуальним завданням сучасного авіадвигунобудування.

Для фінішної обробки валів, лопаток і дисків ротора компресора ГТД широке застосування отримали методи поверхневого пластичного деформування (ППД), такі як алмазне вигладжування, віброударне,

пневмодробеструйне, дробоструменеве, ультразвукове зміцнення та ін.

Аналіз досліджень і публікацій

Аналіз руйнування дисків компресора при експлуатації показав, що основною причиною їх руйнування є ушкодження втомного характеру [1].

При цьому осередок зародження тріщини втомі може бути розташований на поверхнях сполучення, як паза, так і міжпазового виступу (МПВ).

У виробництві дисків компресора на фінішних технологічних операціях застосовують віброабразивну обробку [2], яка забезпечує основні вимоги їхньої остаточної обробки.

Віброобробка на установках ВУД-1000ДМ забезпечує зниження шорсткості до $R_z = 6,8$ мкм та залишкові напруги стиснення до 786 МПа з глибиною поширення до 2,2 мкм.

Показано можливість підвищення опору втоми дисків компресорів обкаткою роликми галтелів та дробоструменевою обробкою [3].

У роботі [4] представлені результати експериментальних досліджень щодо підвищення опору втоми обідної частини дисків компресора ультразвуковим зміцненням (УЗЗ).

Проведені експериментальні дослідження дозволили підвищити межу витривалості на 31...35 %.

Показано вплив фінішних методів обробки пазів дисків компресора на їх несучу здатність при робочій температурі [5].

В області робочих температур ефект від застосування поверхневого деформаційного зміцнення помітно знижується, що, ймовірно, пов'язано з релаксацією стискаючих залишкових напруг, сформованих у поверхневому шарі МПВ диска.

Вплив комбінованих оброблювально-зміцнювальних методів обробки оцінювався за допомогою коефіцієнта зміцнення [6, 7].

Виконано оцінку дробометного зміцнення сталевими мікрокульками. Показано, що обробка диска мікрокульками підвищує межу витривалості та знижує чутливість до концентрації напруг [8].

Полірування полотна дисків сизалевими колами з абразивними рідкими пастами підвищує опір втоми.

Межа витривалості підвищується на 12 % [7].

Широке застосування отримав метод фінішної обробки дисків компресора в псевдозрідженому шарі абразиву (ПША) [9].

Фактори, що визначають ефективність процесу турбоабразивної обробки у ПША

Ефективність процесу (продуктивність обробки, шорсткість поверхонь, рівномірність обробки та ін.) визначають наступні вхідні параметри:

- схема розташування оброблюваної деталі по відношенню до площини повітророзподільних решіток (кінематична схема обробки);

- швидкість руху оброблюваної деталі V_0 ;

- час обробки τ ;

- тиск P_0 (витрата Q_0 повітря, яке подається в установку на зрідження абразивного шару);

- зернистість та вид (марка) абразивного зерна;

- фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу (твердість, міцність);

- характер вихідної поверхні, що підлягає обробці (висота мікронерівностей та їх напрямки, спосіб попередньої обробки – точіння, фрезерування, лиття, штампування тощо) [9].

Технологічні можливості обробки в ПША

Аналіз результатів робіт та досліджень, викладений у [9] та накопичений підприємствами досвід промислового застосування ПША показує, що цей метод дозволяє ефективно вирішувати наступні

технологічні завдання:

- фінішна обробка (полірування) поверхонь складнопрофільних, легкодеформованих, тонкостінних деталей зі зменшенням вихідної шорсткості з $R_a = 2,5 \dots 5,0$ мкм до $R_a = 0,2 \dots 0,4$ мкм;

- видалення задирок після різних операцій обробки різанням;

- скруглення гострих кромки;

- фінішна зміцнююча обробка елементів поверхонь, особливо складнопрофільних деталей ГТД;

- підготовка поверхонь під покриття різного виду (гальванічні, плазмові та ін.);

- видалення окалини після термообробки, слідів корозії, нагару, окисних плівок тощо.

Обробка дисків компресора діаметром від 200 до 820 мм проводиться на спеціальних установках моделей АПС-350Б, АПС-600, АПС-1000 і АПСБ-1000.

Обробка зварних барабанів роторів компресорів ГТД

Після зварювання дисків в барабани проводять їх наступний відпал для зняття термічної напруги, який залежно від режимів термообробки, частково або повністю релаксує залишкові напруження стиску від попереднього зміцнення дисків, знижуючи їх довговічність до вихідного стану.

Обробка відпалених зварних барабанів роторів компресорів ГТД у ПША дозволяє забезпечити зміцнення обідної частини їх дисків і, отже, збільшення їх довговічності [1].

Мета роботи

Підвищення довговічності роторів компресорів ГТД обробкою в псевдозрідженому шарі абразиву.

Методи й обладнання для дослідження

Досліджували вплив обробки барабанів роторів компресора в ПША із застосуванням спеціальних повітряних сопел та без застосування сопел на їх довговічність. Барабани роторів КВТ оброблялися на установці моделі АПС-600 (рис. 1) за наступних технологічних умов:

1. Частота обертання шпинделя деталі $n = 900$ об/хв.

2. Глибина занурення барабана в абразив: $h = R_{\text{барабана}}$.

3. Абразивне зерно: 14А № 32–40.

4. Тиск повітря під повітророзподільною решіткою (у повітряно подаючій камері)

$P_{BK} = 11,0 \pm 1$ кПа (1100 ± 10 мм.вод.ст.).

5. Тиск повітря в соплах

а) при подачі струменя на гостру кромку

$P_B^O = 160 \pm 10$ кПа ;

б) при подачі струменя на тупу кромку

$P_B^T = 120 \pm 10$ кПа .

6. Відстань від зрізу повітряних сопел до оброблюваних крайок пазів:

$L = 15 - 20$ мм.

7. Кут нахилу сопел:

а) до осі пазів: $\gamma = 15^\circ \pm 5^\circ$

б) до площини дна пазів: $\varphi = 45^\circ - 60^\circ$.

8. Сумарний машинний час обробки $t = 300$ с (із періодом між реверсами 50 с).

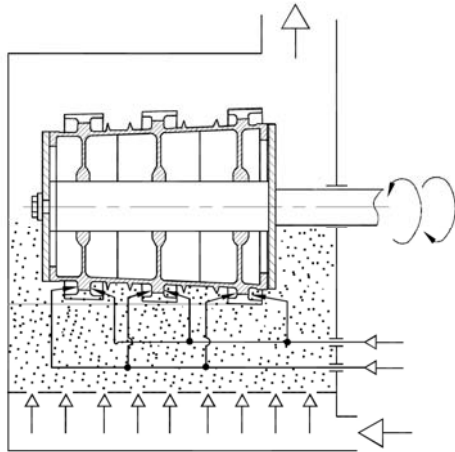


Рис. 1. Схема обробки барабана ротора компресора методом ПША із застосуванням спеціальних повітряних сопел

При вищевказаних режимах оброблялися два барабани КВТ авіаційного двигуна Д-36:

а) барабан КВТ із посиленими дисками IV і V ступенів з обробленими в ПША по серійному техпроцесу дисками до їхнього зварювання в барабан;

б) барабан КВТ (не посилений) із дисками, які оброблені по раніше існуючій технології (обробка кромки пазів вручну зенкерами та шліфувальною шкуркою).

Обидва барабана наробітки в складі двигуна не мали.

Повітряні сопла розміщалися в шарі абразиву й були спрямовані на кромки дна пазів диска IV ступеня з боку обох його торців (вхідна та вихідна сторони диска).

Проводився візуальний огляд пазів дисків IV ступеня КВТ, які оброблені в барабанах із застосуванням і без застосування повітряних сопел.

Зразки вирізалися з одного диска IV ступеня КВТ, який був оброблений методом ПША в складі барабана без застосування сопел з подальшим відпалом при $T = 750$ °С. Потім, половина диска була закрита фольгою та була застосована його повторна обробка у ПША в складі барабана із застосуванням повітряних сопел.

Зразки випробовувалися з відтворенням радіальних й окружних напруг в основі міжпазового виступу (рис. 2, 3). Випробування проводилися на машині УМЕ-1ТМ при $T = 400$ °С, трикутній формі циклу з коефіцієнтом асиметрії циклу $r = 0,1$ і частотою навантаження $f = 0,07$ Гц. Верхній рівень навантаження вдвічі перевищував експлуатаційний і становив $P_{\max} = 4900$ Н. При цьому біля основи МПВ,

$\sigma_r = 100$ МПа; $\sigma_\theta = 430$ МПа.

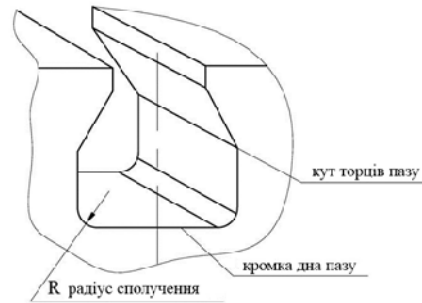


Рис. 2. Паз диска IV ступеня КВТ авіаційного двигуна Д-36 типу «ластівкин хвіст»

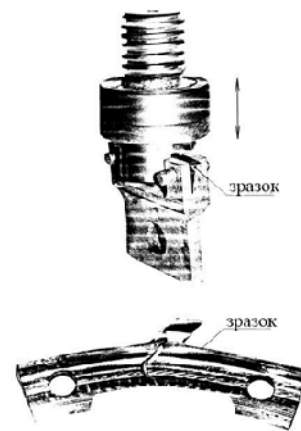


Рис. 3. Характер руйнування зразків, які вирізані з диска IV ступеня

Дослідження впливу температури відпалу після обробки барабанів ротора компресора в пша на його довговічність

Зразки вирізалися з одного диска I ступеня КВТ, який оброблявся методом ПША у складі барабана. Після чого одні зразки відпалювалися при $T = 550$ °С, а інші – при $T = 750$ °С (серійна технологія відпалу).

Зразки випробовувалися відтворенням тільки радіальних напруг в основі МПВ. Випробування проводилися на машині ЭДЦ-20 при $T = 20$ °С, частота навантаження 8 Гц з коефіцієнтом асиметрії циклу $r = 0,2$ і максимальному зусиллі, що вдвічі перевищує експлуатаційне $P_{\max} = 21600$ Н. При цьому біля основи МПВ $\sigma_r = 131$ МПа.

Результати досліджень та їх обговорення

Результати дослідження впливу умов обробки барабана ротора компресора в ПША на циклічну довговічність зразків при $T = 400$ °С, які вирізані з диска IV ступеня КВТ авіаційного двигуна Д-36, представлені на рис. 4.

Циклічна довговічність визначалася по середньому числу циклів до руйнування, які показані на рис. 4.

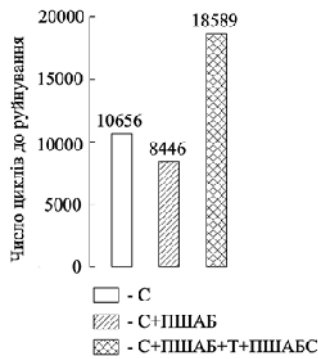


Рис. 4. Вплив обробки в псевдозрідженому шарі абразиву диска IV ступеня КВТ двигуна Д-36 у складі барабана на середню циклічну довговічність:

С – серійна обробка диска – точіння + протяжка й закруглення кромки абразивними стрічками;
 ПШАБ – обробка методом ПША в складі барабана, без застосування повітряних сопел; Т – відпал при $T = 750^{\circ}\text{C}$;
 ПШАБС – обробка методом ПША в складі барабана з застосуванням повітряних сопел

Середня довговічність титанових зразків зі сплаву ВТ9, які оброблені методом ПША в складі барабана з застосуванням повітряних сопел у 2,2 рази більше, ніж середня довговічність зразків, неопрацьованих зазначеним методом.

Візуальний огляд пазів диска IV ступеня КВТ, який оброблений у складі барабана із застосуванням повітряних сопел показав:

1. На відміну від обробки в ПША без застосування повітряних сопел забезпечується більш якісна обробка крайок по дну й у кутах торця пазів;
2. Забезпечується обробка сполучення дна паза з контактними гранями.

Після наробітку ротора КВТ у процесі експлуатації на двигуні середня циклічна довговічність зразків, які вирізані з диска IV ступеня, знижується (рис. 5).

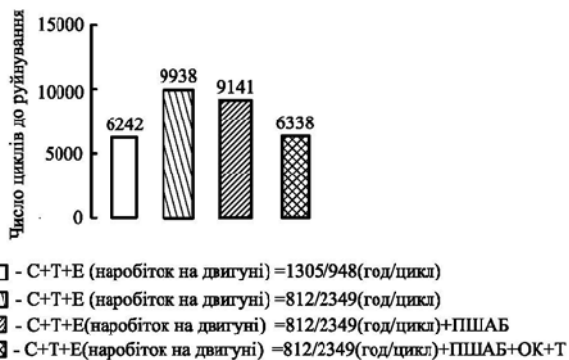


Рис. 5. Вплив варіантів обробки в псевдозрідженому шарі абразиву диска IV ступеня КВТ двигуна Д-36 у складі барабана після наробітки в експлуатації на середню циклічну довговічність:

Е – експлуатація в год/цикл; ОК – зняття окисного шару методом травлення

Відпал при $T = 750^{\circ}\text{C}$ повністю знімає ефект від зміцнення, який отримано після обробки в ПША. Повторна обробка диска в складі барабана методом ПША відновлює його довговічність до вихідного стану.

Низькотемпературний відпал барабана при $T = 550^{\circ}\text{C}$ є більше кращим, чим відпал при температурі $T = 750^{\circ}\text{C}$, тому що середня циклічна довговічність диска, підданого відпалу при $T = 550^{\circ}\text{C}$ в 1,76 раз більше, ніж диска, що відпалювали при $T = 750^{\circ}\text{C}$ (рис. 6).

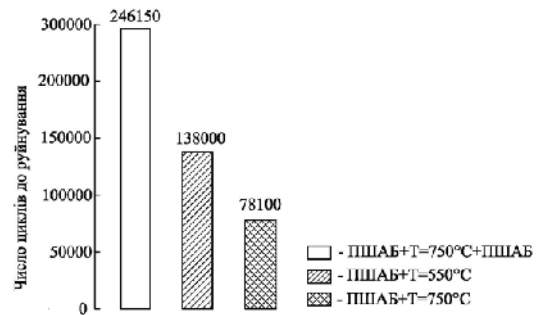


Рис. 6. Вплив температури відпалу після обробки диска I ступеня КВТ двигуна Д-36 у псевдозрідженому шарі абразиву в складі барабана на середню циклічну довговічність

Висновки

1. Обробка барабана ротора КВТ у ПША без застосування повітряних сопел після відпалу не робить істотного впливу на довговічність диска IV ступеня.
2. Обробка барабана ротора КВТ у ПША у складі барабана із застосуванням повітряних сопел збільшує довговічність в 2,2 рази у порівнянні з обробкою у ПША без сопел.
3. Низькотемпературний відпал барабана при $T = 550^{\circ}\text{C}$ є більш кращим, ніж відпал при $T = 750^{\circ}\text{C}$, тому що його циклічна довговічність більше в 1,76 раз.
4. Відпал при 750°C повністю знімає ефект зміцнення, який отримано після обробки в ПША. Повторна обробка диска в складі барабана методом ПША відновлює його довговічність до вихідного стану.

Список літератури

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Диски компрессора и турбины: монография / В. А. Богуслаев, И. Ф. Кравченко, А. Я. Качан и др. – Ч. III. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2011. – 428 с.
2. Картышев Б. Н. Виброобработка дисков ГТД / Б. Н. Картышев, А. Б. Родиченко // Авиационная промышленность. – 1976. – № 3. – С. 23–25.
3. Агишев Б. М. Применение методов поверхностного пластического деформирования для повышения усталостной прочности дисков компрессоров авиационных ГТД / Б. М. Агишев, А. А. Еланцев, Н. В. Моисеенков // Проблемы прочности. – 1977. – № 3. – С. 114–116.

4. Сахно А. Г. Оптимизация режима ультразвукового упрочнения ободной части дисков компрессора / А. Г. Сахно, В. К. Яценко, И. А. Стебельков // *Авиационная промышленность*. – 1993. – № 2. – С. 12–13.

5. Гончар Н. В. Выносливость ободной части дисков компрессоров из жаропрочного титанового сплава ЭИ 698-ВД в условиях рабочих температур / Н. В. Гончар, В. К. Яценко, Д. В. Павленко // *Вестник двигателестроения*. – 2004. – № 3. – С. 20–23.

6. Гончар Н. В. Регулирование характеристик выносливости дисков компрессоров, работающих в условиях умеренно-повышенных температур / Н. В. Гончар, А. Г. Сахно, В. К. Яценко // *Придніпровський науковий вісник. Машинобудування та технічні науки*. – 1998. – № 50(117). – С. 24–33.

7. Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко. – К.: Манускрипт, 1993. – 333 с.

8. Катаев Н. К. Повышение надежности работы диска компрессора низкого давления ГТД / Н. К. Катаев // *Совершенствование процессов абразивно-отделочной и упрочняющей технологии в машиностроении*: сб. науч. трудов. – Пермь: Изд. Пермский Политехнический институт. – 1984. – С. 109–113.

9. Технология производства авиационных двигателей. Часть III. Методы обработки деталей авиационных двигателей / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. К. Яценко и др. – Запорожье: Изд. ОАО «Мотор Сич», 2008. – 638 с.

Одержано 07.04.2022

Kachan O., Ulanov S. Improvement in durability of welded drums compressor rotors by treatment in fluidized bed of abrasive material

Purpose. *Improvement in durability of welded drums of compressor rotors of the gas turbine engines by treatment in fluidized bed of abrasive material.*

Methods of research. *The investigations were carried out on the welded drums of rotors of high pressure compressor (HPC) of the D-36 aero engine. The drums were treated in the fluidized bed of abrasive material of the АПС-600 installation without the nozzles and with the use of special air-blast nozzles.*

Test specimens for checking durability were cut of HPC stages 1 and 4 discs after carrying out various machining processes.

Durability testing of test specimens cut of HPC stage 4 disc was carried out at the УМЭ-1 ТМ machine at temperature $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Durability testing of test specimens cut of HPC stage 1 disc was carried out at the ЭДЦ-20 machine at temperature $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Results. *It was found that averaged cyclic life of the test specimens made of titanium alloy BT-9, treated in the fluidized bed of abrasive material being a part of the drum with the use of air-blast nozzles, is 2.2 times higher than the averaged cyclic life of the test specimens treated in the fluidized bed of abrasive material without the use of air-blast nozzles at temperature $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$.*

When treating the drum of the HPC rotor in the fluidized bed of abrasive material without the use of air-blast nozzle, better treatment of the bottom of the slot and corners of its end faces is ensured.

Low-temperature annealing of the drum at temperature $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ is preferable than at $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$, since cyclic life of the test specimens annealed at $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ is somewhat higher.

Annealing at $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ removes completely strengthening effect obtained by treatment in the fluidized bed of abrasive material.

Successive treatment of the disc as a part of the drum in the fluidized bed restores its durability to the initial state.

Scientific novelty. *It was demonstrated that treatment of the welded drums of the compressor rotors in the fluidized bed of abrasive material with the use of special air-blast nozzles improves the quality of treatment and cyclic life if compared to the treatment without air-blast nozzles.*

Annealing temperature for the compressor rotor drum, which ensures high average cyclic life, was established.

Practical value. *There were offered technological procedure and modes of treatment of the welded drums of the HPC of the D-36 aero engine in the fluidized bed of abrasive material with the use of special air-blast nozzles, ensuring durability 2.2 times higher than without the use of the air-blast nozzles.*

Key words: *disc, compressor rotor drum, air-blast nozzles, fluidized bed of abrasive material, cyclic life.*