

УДК 621.438-226.739.6

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ СОВРЕМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.А. ПЕТРОВА, МЕХДИ СААДАТИБАИ, А.И. ТАРАСОВ

В статье проведен анализ влияния эксплуатационных условий на работу лопаток турбины в составе двигателя. В результате установлены факторы, приводящие к снижению долговечности рабочих лопаток в эксплуатации, характерные дефекты лопаток турбины, а также делается вывод о необходимости применения защитного покрытия на них.

Ключевые слова: покрытие, лопатка, долговечность, высокотемпературная коррозия, жаростойкость.

Совершенствование газотурбинных двигателей сопровождается ростом параметров цикла работы двигателя [1].

Особенностью работы лопаток турбин практически всех двигателей являются переменные нагрузки, высокие температуры газа перед турбиной, наличие высокоскоростного газового потока, которые в значительной мере усложняют условия работы лопаток в составе изделий [1-4].

Лопатки турбины высокого давления имеют сложную форму внутренней полости для организации циклонно-вихревой системы охлаждения [3; 4]. Применение такой системы охлаждения обеспечивает существенное снижение температуры металла лопаток турбины, но не позволяет снизить температуру лопатки и обеспечить достаточную жаростойкость без применения защитного покрытия. Поверхность пера лопатки с целью повышения жаростойкости покрывают жаростойким покрытием.

Жаростойкие покрытия не только уменьшают развитие окислительных процессов при эксплуатации. Роль покрытий более значительна, если учесть, что трещины зарождаются в поверхностных слоях материала [2; 4-6].

Вместе с тем при циклическом изменении температуры возникают значительные температурные напряжения, которые существенно осложняют напряженное состояние поверхностных слоев и могут привести к образованию трещин (рис. 1). Градиент температуры по поверхности и сечению стенок лопаток приводит к возникновению значительных термических напряжений, достигающих наибольших значений на нестационарных режимах работы двигателя [2; 4]. Кроме того, уже при литье трехлопаточного блока из-за сложной его конструкции могут возникать внутренние напряжения, которые в процессе эксплуатации накапливаются, и приводят также к образованию трещин в поверхностном слое [3].

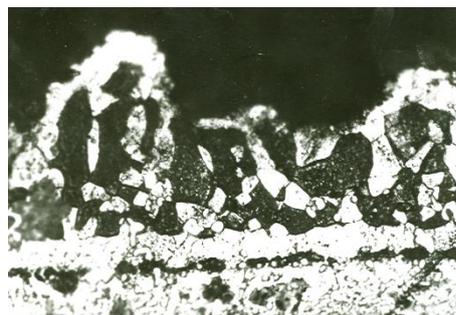
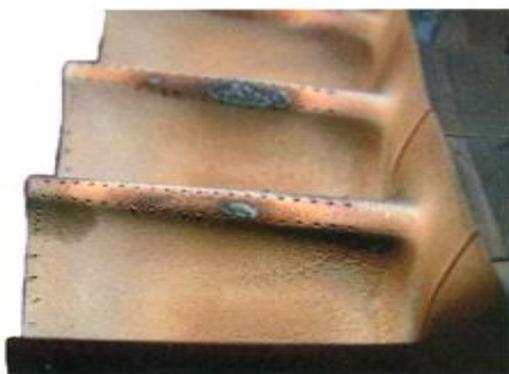
Совместное действие температуры, напряжений и окислительной среды приводит к диффузионным процессам в поверхностных слоях лопаток, ограничивающих их долговечность [2; 5-6].

При горении смеси топлива и воздуха образуется поток горячих газов, для которого характерны высокие давление, температура и скорость. Кроме этого, лопатки турбины испытывают значительные напряжения от действия центробежных и газодинамических сил, воздействия агрессивной среды продуктов сгорания топлива и атмосферы воздуха. Уменьшение защитных свойств может происходить также и за счет эрозионного износа под действием высокотемпературного газового потока за время эксплуатации (рис. 2). Отчетливо виден эрозионно-коррозионный износ входной кромки лопатки, который происходит в результате многочисленных ударов твердых частиц, что приводит к механическому разрушению покрытия [2; 4; 6-8]. Высокое содержание углерода в топливе усиливает эрозионное воздействие газового потока, приводит к ускорению коксования на деталях и сульфидной коррозии, усиливающей суммарный эффект разрушающего воздействия.



×200

Рис. 1. Внешний вид блока соплового аппарата с трещинами на поверхности после 350 ч наработки



×600

а

б

Рис. 2. Коррозионно-эрозионное повреждение входной кромки рабочей лопатки ТВД:
а – внешний вид; б – микроструктура

Избыточная подача воздуха в двигатель обеспечивает окислительную атмосферу продуктов сгорания. Вышеперечисленные условия работы рабочих лопаток турбины приводят к появлению большого количества дефектов материала лопатки, таких как: коагуляция γ' - фазы, выделение и укрупнение карбидов, прогар защитного покрытия (рис. 2б), образование термоусталостных трещин (рис. 1) и сульфидная коррозия [2; 4; 7; 9]. Эти дефекты так же могут быть обусловлены условиями эксплуатации двигателя.

Необходимость увеличения мощности и коэффициента полезного действия газовых турбин почти всех типов двигателей влечет увеличение температуры газа на входе в турбину. Поэтому основным фактором, ограничивающим ресурс лопаток турбины, является высокотемпературная коррозия. Явление состоит в ускоренном, часто катастрофическом воздействии на поверхность жаропрочных сплавов, которое связано с примесями, присутствующими в топливе и воздухе [2; 4; 9]. Основными примесями топлива являются ванадий, сера и натрий. Состав и концентрация загрязнений, поступающих с воздухом, зависят от географических и метеорологических факторов, от состояния взлетных полос. Наиболее часто с воздухом всасываются элементы Na, Mo, Ca, Si, а также анионы Cl^- и SO_4^{2-} , причем количество их изменяется в очень широких пределах. Эти элементы и соединения взаимодействуют в газовой среде, а образующиеся продукты реакции конденсируются на лопатках двигателя. Считается, что наиболее важным компонентом конденсата является Na_2SO_4 [4]. Однако это достаточно упрощенное представление, поскольку высокотемпературная коррозия протекает в сложных сплавах и различных газовых средах при различных циклических условиях работы двигателей. Всевозможные сочетания указанных параметров приводят к появлению множества особых случаев коррозии. Однако в подавляющем большинстве случаев причиной сульфидной коррозии является

образование легкоплавких эвтектик, в частности сульфидных ($\text{Ni} - \text{Ni}_3\text{S}_2$, $t_{\text{пл}} \sim 645^\circ \text{C}$), сульфидных фаз ($t_{\text{пл}} \sim 580^\circ \text{C}$), иногда — оксидов с низкой температурой плавления (V_2O_5 , $t_{\text{пл}} \sim 675^\circ \text{C}$; MoO_3 , $t_{\text{пл}} \sim 795^\circ \text{C}$). Оксид молибдена образовывается при окислении сплавов с его повышенным содержанием [2; 4]. Оксиды ванадия образуются в результате сгорания топлива, содержащего органическое соединение $\text{C}_{36}\text{H}_{40}\text{O}_5\text{N}_4\text{V}$. Количество V_2O_5 в золе топлива изменяется в большом интервале (5-80%) и определяется месторождением сырья. Загрязняя окалину, оксиды V_2O_5 и MoO_3 приводят к переходу поверхностного слоя в жидкое состояние. Реакция диссоциации V_2O_5 , идущая на границе раздела «металл – расплавленный оксид» с повышением температуры и образованием кислорода, который растворяется в этом расплаве, ведет к возникновению пористого слоя оксида, пронизанного трещинами, и защита оксидами в этих условиях неэффективна.

Катастрофическое окисление с образованием оксида ванадия, ванадатов и других подобных соединений наблюдается сравнительно редко. Однако разрушительное действие V_2O_5 усиливается в присутствии 10-20% раствора Na_2SO_4 , который также является продуктом сгорания топлива, содержащего натрий и серу, и известен как самостоятельный корродирующий агент [4].

Современные жаропрочные сплавы, применяемые для изготовления лопаток турбины и соплового аппарата, неспособны длительно работать в таких условиях. Для обеспечения межремонтного ресурса рабочие лопатки турбины современных двигателей нуждаются в высокоэффективной защите от газовой коррозии. Необходимость в создании эффективных покрытий очевидна.

Таким образом, основными факторами, ограничивающими долговечность двигателей, являются неравномерное и высокое поле температур перед турбиной, циклы переменных нагрузок, высокотемпературное окисление.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Двигатели 1944-2000. Авиационные, ракетные, морские, промышленные* / под редакцией И.Г. Шустова. М.: «АКС – Конверсалт», 2000. 408 с.
2. **Самойленко В.М.** *Методика восстановления лопаток турбины газотурбинных двигателей*. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. С. 102.
3. **Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И.** *Производство лопаток газотурбинных двигателей*. М.: Машиностроение, 2002.
4. **Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С.** *Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов*. М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. 622 С.
5. **Самойленко В.М., Фатьянов Е.А., Настас Г.Н., Казарян В.А.** Влияние диффузионных процессов на долговечность защитных покрытий // *Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России*. 2010. № 1. С. 42-45.
6. **Настас Г.Н., Пашенко Г.Т., Петрова М.А., Самойленко В.М.** Возможность оценки долговечности жаростойких покрытий // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2014. № 206. С. 52-55.
7. **Иванов Е.Г., Опокин В.Г., Равилов Р.Г., Самойленко В.М.** Оценка эксплуатационной эффективности диффузионных покрытий для лопаток турбины современных газотурбинных двигателей // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2014. № 206. С. 56-58.
8. **Самойленко В.М., Фатьянов Е.А., Равилов Р.Г., Казарян В.А.** Влияние природы металлического подслоя на долговечность теплозащитного покрытия // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. № 2. С. 32.
9. **Самойленко В.М., Фатьянов Е.А., Настас Г.Н., Казарян В.А.** Жаростойкость защитных покрытий на никелевых сплавах // *Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России*. 2010. № 1. С. 45-48.

ANALYSIS OF MODERN TURBINE ENGINES WORKING SURFACE LAYERS BLADES WORK CONDITIONS

Petrova M.A., Mehdi Saadatibai, Tarasov A.I.

In the article the analysis of engine turbine blades performance operation conditions influence is presented. As a result the factors, resulting in poor durability of the blades in operation, the characteristic defects of the turbine blades are determined and the conclusion on the necessity of applying a protective coating on them is made.

Keywords: cover, shoulder, durable, high temperature corrosion, heat resistance.

REFERENCES

1. *Dvigateli 1944-2000. Aviacionnye, raketnye, morskije, promyshlennye*. Pod red. I.G. Shustova. M.: «AKS – Konversalt». 2000. 408 p. (In Russian).
2. **Samojlenko V.M.** *Metodika vosstanovlenija lopatok turbiny gazoturbinnih dvigatelej*. M.: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo. 2008. P. 102. (In Russian).
3. **Krymov V.V., Eliseev Ju.S., Zudin K.I.** *Proizvodstvo lopatok gazoturbinnih dvigatelej*. M.: Mashinostroenie. 2002. (In Russian).
4. **Abraimov N.V., Eliseev Ju.S.** *Himiko-termicheskaja obrabotka zharoprochnyh stalej i splavov*. M.: «Internet Inzhiniring». 2001. 622 p. (In Russian).
5. **Samojlenko V.M., Fat'janov E.A., Nastas G.N., Kazarjan V.A.** Vlijanie diffuzionnyh processov na dolgovechnost' zashhitnyh pokrytij. *Oboronnyj kompleks - nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii*. 2010. № 1. Pp. 42-45. (In Russian).
6. **Nastas G.N., Pashhenko G.T., Petrova M.A., Samojlenko V.M.** Vozmozhnost' ocenki dolgovechnosti zharostojkih pokrytij. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2014. № 206. Pp. 52-55. (In Russian).
7. **Ivanov E.G., Opokin V.G., Ravilov R.G., Samojlenko V.M.** Ocenka jekspluacionnoj jeffektivnosti diffuzionnyh pokrytij dlja lopatok turbiny sovremennyh gazoturbinnih dvigatelej. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2014. № 206. Pp. 56-58. (In Russian).
8. **Samojlenko V.M., Fat'janov E.A., Ravilov R.G., Kazarjan V.A.** Vlijanie prirody metallicheskogo podsloja na dolgovechnost' teplozashhitnogo pokrytija. *Korrozija: materialy, zashhita*. 2012. № 2. Pp. 32. (In Russian).
9. **Samojlenko V.M., Fat'janov E.A., Nastas G.N., Kazarjan V.A.** Zharostojkost' zashhitnyh pokrytij na nikelovyh splavah. *Oboronnyj kompleks - nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii*. 2010. № 1. Pp. 45-48. (In Russian).

Сведения об авторах

Петрова Мария Александровна, окончила МГТУ ГА (2011), аспирантка МГТУ ГА, автор 5 научных работ, область научных интересов – технология производства и ремонт авиационной техники.

Мехди Саадатибаи, 1988 г.р., окончил МГТУ ГА (2013), аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – технология производства и ремонт авиационной техники.

Тарасов Андрей Иванович, 1981 г.р., окончил МАИ (2004), преподаватель МАИ, автор 5 научных работ, область научных интересов – технология производства и ремонт авиационной техники.