

УДК 621.438-226.739.6

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-72-80

Влияние примесей, содержащихся в топливе и воздухе, на сульфидную коррозию лопаток турбины газотурбинных двигателей

В.М. Самойленко¹, Г.Т. Пащенко², Е.В. Самойленко¹,
А.А. Гнездилова¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО»,
г. Москва, Россия

Аннотация: В процессе совершенствования газотурбинных двигателей (ГТД), повышения ресурса и коэффициента полезного действия (КПД) происходит постоянный рост температуры и давления рабочего тела. Элементы турбины подвергаются высоким термомеханическим нагрузкам и непрерывному воздействию со стороны агрессивной среды. Эти воздействия особенно существенны для рабочих лопаток первых ступеней турбины ГТД, находящихся в области наиболее высоких температур. Один из самых серьезных видов повреждений в данном случае – коррозионное воздействие на рабочую лопатку со стороны газовых продуктов сгорания, поступающих в проточную часть турбины. Применяемое на воздушном судне (ВС) топливо ТС-1 содержит в своем составе сернистые соединения – элементарную серу и меркаптаны, что в процессе сгорания совместно с находящимися в воздухе натрием и калием приводит к агрессивному воздействию на материал рабочей лопатки турбины ГТД. Для обеспечения длительной работы лопаток турбины ГТД при температуре газа на входе в турбину до 800...850 °С содержание данных продуктов как в топливе, так и в воздухе, согласно нормативно технической документации, ограничивают. Однако исключить их полностью пока нет возможности. Присутствие соединений серы на лопатках турбины ГТД вызывает протекание сульфидной коррозии. Поэтому в статье рассматривается влияние примесей в топливе и воздухе на процесс протекания сульфидной коррозии материала лопаток турбины ГТД. Представлен механизм растворения серы в оксидах металла или защитного покрытия, а также диффузия оксида серы с поверхности покрытия в его глубь. Установлена причина влияния содержащегося в воздухе хлористого натрия на коррозию никелевого сплава или применяемого на нем защитного покрытия. Приводится влияние находящегося в топливе ванадия на скорость коррозии. С целью увеличения работоспособности рабочих лопаток турбины ГТД при воздействии такой агрессивной среды предлагается применение нового покрытия, формируемого из водной суспензии и позволяющего ввести в состав покрытия хром, что обеспечивает более высокую долговечность такого покрытия в сравнении с серийными алюминиевыми покрытиями. Введение хрома обеспечивается за счет экзотермической реакции, протекающей в процессе формирования покрытия при термической обработке.

Ключевые слова: сера, сульфидная коррозия, атомная решетка, защитное покрытие, коррозионные процессы, примеси, никелевый сплав.

Для цитирования: Самойленко В.М. Влияние примесей, содержащихся в топливе и воздухе, на сульфидную коррозию лопаток турбины газотурбинных двигателей / В.М. Самойленко, Г.Т. Пащенко, Е.В. Самойленко, А.А. Гнездилова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 72–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-72-80

Influence of impurities contained in fuel and air on sulfide corrosion of turbine blades of the gas turbine engine

V.M. Samoylenko¹, G.T. Paschenko², E.V. Samoylenko¹,
A.A. Gnezdilova¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia,

²Experimental Design Bureau named after A. Lyulka – Branch of PJSC “UEC-UMPO”,
Moscow, Russia

Abstract: In the process of improving gas turbine engines (GTE), increasing the resource and efficiency, there is a constant increase in temperature and pressure of the working fluid. Turbine elements are subjected to high thermomechanical loads and

continuous exposure from the aggressive environment. These impacts are especially significant for the working blades of the first stages of the turbine, located in the area of the highest temperatures. One of the most serious types of damage in this case is the corrosive effect on the working blade from the combustion gases entering the flow part of the turbine. The TS-1 fuel used on an aircraft contains sulfur compounds in its composition – elemental sulfur and mercaptans, which in the combustion process, together with sodium and potassium in the air, leads to an aggressive effect on the material of the turbine blade. To ensure the long-term operation of the turbine blades of the turbine at the gas temperature at the turbine inlet up to 800...850 °C, the content of these products in both fuel and air is limited according to the regulatory and technical documentation. However, it is not yet possible to exclude them completely. The presence of sulfur compounds on the turbine blades of the GTE causes sulfide corrosion. Therefore, the article considers the influence of impurities in fuel and air on the process of sulfide corrosion of the turbine blades material of the turbine. The mechanism of sulfur dissolution in metal oxides or protective coating is presented, as well as the diffusion of sulfur oxide from the coating surface into its depth. The reason for the influence of sodium chloride contained in the air on the corrosion of nickel alloy or the protective coating applied on it has been established. The influence of vanadium in the fuel on the corrosion rate is given. In order to increase the efficiency of the turbine blades when exposed to such an aggressive environment, it is proposed to use a new coating formed from an aqueous suspension and allowing the introduction of chromium into the coating, which provides a higher durability of such a coating in comparison with serial aluminide coatings. The introduction of chromium is ensured by an exothermic reaction occurring during the formation of the coating during heat treatment.

Key words: sulfur, sulfide corrosion, atomic lattice, protective coating, corrosion processes, impurities, nickel alloy.

For citation: Samoylenko, V.M., Paschenko, G.T., Samoylenko, E.V. & Gnezdilov, A.A. (2023). Influence of impurities contained in fuel and air on sulfide corrosion of turbine blades of the gas turbine engine. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 72–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-72-80

Введение

С целью увеличения работоспособности лопаток турбины газотурбинного двигателя (ГТД) разработаны и применяются покрытия различного назначения [1, 2].

Анализ применения защитных покрытий на рабочих лопатках турбины ГТД, а также лабораторные испытания позволяют выделить две характерные области их повреждения в эксплуатации и в процессе испытаний, которые зависят от температуры – это 650...850 °C и выше 1050 °C [2–6]. В интервале температур 900...1050 °C за счет применения защитных покрытий и образующегося на них оксида типа

$Al_2O_3 - Cr_2O_3$, обладающих высокими защитными свойствами от газовой коррозии, идут процессы умеренной коррозии.

Одним из видов повреждений защитных покрытий на лопатках ГТД, вызывающих снижение их работоспособности, является коррозионное воздействие продуктов сгорания топлива и золовых отложений [4, 6, 7, 8] (рис. 1).

Внешний осмотр лопаток после наработки показывает, что на поверхности пера рабочей лопатки обнаружен налет в виде точечных отложений преимущественно на корыте (цвет от светло- до темно-коричневого) (рис. 1, а). На лопатках соплового блока обнаружено в результате воздействия агрессивного газового потока коррозионно-эрозионное повре-

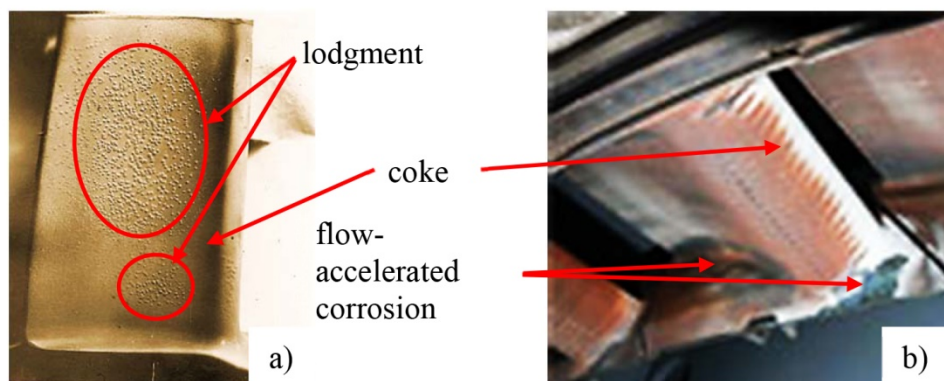


Рис. 1. Внешний вид рабочей (а) и сопловой (б) лопаток после наработки 10 671 час
Fig. 1. The appearance of the working (a) and nozzle (b) blades after operating time 10671 hours

ждение защитного покрытия, а также золотых отложений в виде нагара (рис. 1, б).

Местные, локальные отложения образуются на лопатках, работающих на топливе с повышенным содержанием серы, и в основном состоят из Na_2SO_4 ($\approx 74\%$). Эти отложения являются основным реагентом сульфидной коррозии: нет отложений – нет коррозии.

Следует отметить, что вместе с примесями, попадающими на лопатки турбины ГТД и вызывающими их интенсивную коррозию, газовая атмосфера в турбине в результате воздействия высоких температур является высокоокислительной, что приводит к увеличению скорости протекания коррозии [9–11].

Присутствие соединений серы в продуктах сгорания или в отложениях на лопатках турбины является главным условием для протекания сульфидной коррозии. Поэтому целесообразно рассмотреть механизм внедрения серы в кристаллическую решетку металла или образовавшихся на его поверхности оксидов, что позволит понимать, какие необходимо предпринять меры для уменьшения воздействия сульфидной коррозии.

Результаты проведения исследования и их обсуждение

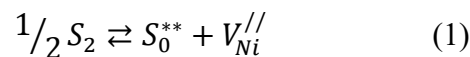
Для понимания механизма сульфидной коррозии, протекающей на лопатках турбины в условиях их эксплуатации, рассмотрим возможные примеси, способствующие развитию коррозии, и источники их появления в камере сгорания.

Основным из агрессивных соединений, поступающих в камеру сгорания вместе с воздухом и способствующих развитию сульфидной коррозии, является хлорид натрия [4, 6, 12]. Особенно это проявляется при эксплуатации воздушных судов в приморских районах и над морем [13].

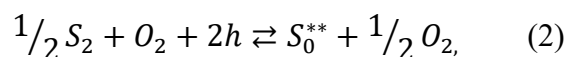
Вместе с топливом в камеру сгорания ГТД могут попадать сера и щелочные металлы, главные коррозионные агенты. При попадании воды в топливо оно может загрязняться хлоридом натрия. Вместе с топливом в камеру сгорания ГТД могут попадать также ванадий, хлор, свинец, углеводород или их соединения [6, 12, 14], что приводит к ускоренному протеканию коррозии.

Для защиты от высокотемпературного окисления на лопатки турбины наносят покрытия, защитные свойства которых проявляются в образовании оксидов алюминия и хрома – Al_2O_3 и Cr_2O_3 . Поэтому при сгорании сера внедряется в виде тонких форм в кристаллическую решетку оксидов и влияет на образование вакансий, т. е. на равновесие дефектов [15].

В процессе эксплуатации при исчерпании защитных свойств покрытия и диффузии никеля в покрытие, на поверхности лопатки образуются оксиды никеля [1, 5]. В этом случае сера внедряется в анионную подрешетку оксида никеля, вызывает снижение концентрации электронных дырок и увеличение концентрации вакансий. Это описывается уравнением



или



где S_0^{**} – электроположительный атом серы, который внедрился на место иона кислорода;

h – электронная дырка;

$V_{Ni}^{//}$ – двухвалентная катионная связь.

Кроме этого, сера может внедряться в межузельное пространство оксидов, при этом не влияя на дефектность кристаллической решетки.

Вагнер в 1930-е годы [16] представил теорию окисления и обнаружил, что скорость диффузии серы в поликристаллических оксидах никеля и кобальта на порядок выше, чем в монокристаллах при температуре $1000\text{ }^\circ\text{C}$ и выше [17, 18].

С целью разработки защитного покрытия, способного длительно работать в условиях агрессивного воздействия серы и хлорида натрия, необходимо выяснить механизм их растворения в оксидах, т. е. их диффузию.

Для протекания диффузии серы должно выполняться следующее условие:

$$P_{S_2}^{//} > P_{S_2}^/ \quad (3)$$

где $P_{S_2}^{//}$ и $P_{S_2}^/$ – парциальные давления серы на границе фаз окалина-газ и окалина-металл

соответственно. Уравнение (3) будет выполняться при выполнении неравенства

$$P_{S_2}' > \exp\left(\frac{2\Delta G_3^0}{RT}\right), \quad (4)$$

где ΔG_3^0 – термодинамический потенциал, R – газовая постоянная, а T – абсолютная температура.

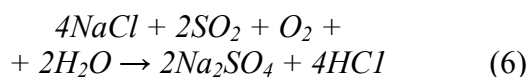
Можно сказать, что диффузия серы в сторону сплава возможна при условии

$$P_{S_2}'' > \exp\left(\frac{2\Delta G_3^0}{RT}\right). \quad (5)$$

Диффузия молекул диоксида серы SO_2 идет по границам зерен, через микротрещины, пустоты в окалине. В процессе диффузии диоксид серы реагирует с металлом окалин и по мере продвижения вглубь активность металла будет возрастать. Поэтому по мере приближения к границе металла парциальное давление кислорода будет уменьшаться. Это значит, что под окалиной могут образовываться сернистые соединения даже при малых давлениях паров серы [18]. Такой процесс указывает на возможность быстрого разрушения никелевого сплава, содержащего следы диоксида серы.

Вместе с сернистыми соединениями в газовый тракт ГТД попадают водные пары, содержащие морскую соль, основной составляющей которой является хлористый натрий $NaCl$ [12], что приводит к увеличению скорости коррозии никелевых сплавов.

Наличие хлористого натрия в топливе или воздухе, поступающем в ГТД, и в присутствии окислов серы при температуре $t_{пл} \approx 885^\circ C$ в продуктах сгорания образуются соединения

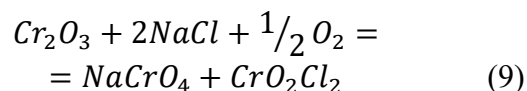
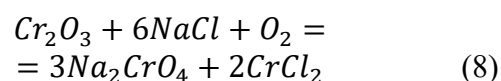


В процессе работы ГТД частицы хлористого натрия, попадая на лопатки турбины, оседают на их поверхности и сульфатируются.

Применяемые на лопатках турбины ГТД защитные покрытия [1, 5] образуют оксиды

алюминия и хрома – Al_2O_3 и Cr_2O_3 . С оксидом алюминия хлористый натрий практически не взаимодействует. С оксидом хрома, как и с хромом, содержащимся в сплаве, хлористый натрий образует летучие продукты, которые способствуют вспучиванию и разрушению пленки. Несмотря на это, сопротивляемость воздействию хлористого натрия оказывают покрытия, на которых образуется оксид хрома – Cr_2O_3 .

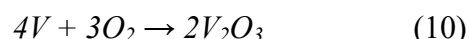
Основная причина влияния хлористого натрия связана с протеканием химических реакций:



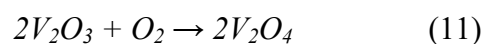
С увеличением температуры увеличивается образование летучих хлоридов и оксихлоридов хрома, что приводит к увеличению влияния хлористого натрия на коррозию никелевого сплава.

Большое влияние на увеличение скорости коррозии оказывает примесь ванадия в топливе. При сгорании топлива, содержащего ванадий, в зависимости от температуры могут образовываться соединения:

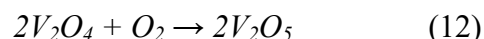
– трехокись ванадия (температура плавления $t_{пл} = 1970^\circ C$):



– четырехокись ванадия ($t_{пл} = 1970^\circ C$):



– пятиокись ванадия ($t_{пл} = 675^\circ C$):



Механизм влияния ванадия на общий коррозионный процесс сводится к разрушению оксидной пленки, увеличению ее пористости и ускорению окисления под влиянием V_2O_5 , а также увеличению диффузионного потока через оксид хрома под влиянием хлористого натрия.

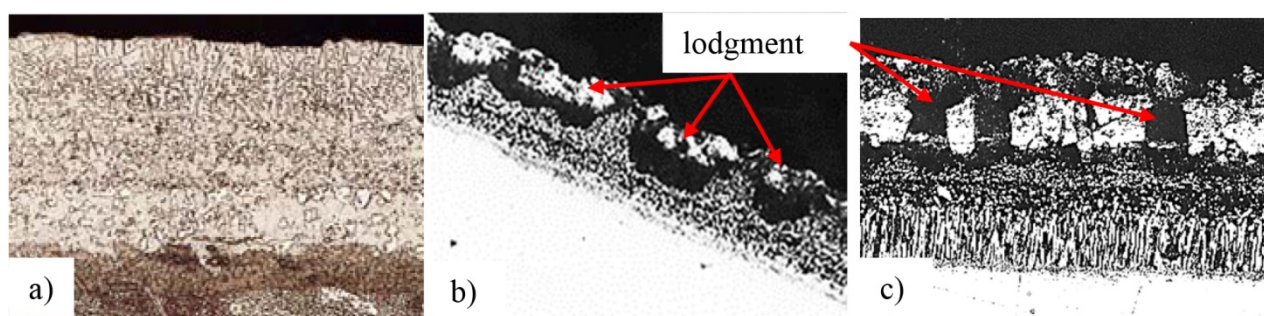


Рис. 2. Микроструктура покрытия АЖ-8 на лопатке до наработки (а) и с наработкой 10 671 час на пере со стороны корыта (б) и спинки (в)
Fig. 2. The microstructure of the coating AZH-8 on the blade before operating time (a) and with an operating time of 10671 hours on the side of the trough (b) and the back (c)

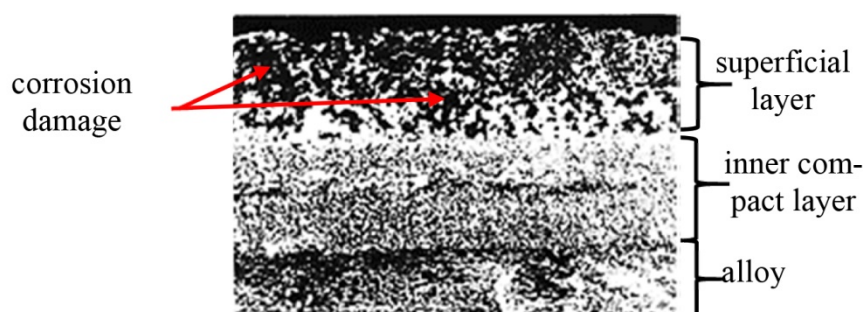


Рис. 3. Микроструктура покрытия АЖ-8 после лабораторных испытаний на сульфидную коррозию
Fig. 3. Microstructure of AZH-8 coating after laboratory tests for sulfide corrosion

Представленный механизм разрушения защитных покрытий на лопатках турбины подтверждается проведенным авторами исследованием. Анализу были подвергнуты лопатки (рис. 1, а) турбины ГТД, установленного на газоперекачивающей станции. Были проведены металлографические исследования рабочих лопаток в месте наибольшего скопления отложений (рис. 1, а) после наработки и исходного защитного покрытия (рис. 2).

Как видно, в местах локальных отложений наблюдается коррозионное поражение наружной зоны покрытия АЖ-8. Коррозионное поражение защитного покрытия имеет фронтальный (площадной) характер на длине 500...700 мкм под слоями локальных (местных) солевых отложений. При питтинговом поражении слоя покрытия происходит распространение коррозии в виде клина в глубину покрытия.

Такой характер коррозионного поражения покрытия АЖ-8 подтверждается и проведенными исследованиями на сульфидную коррозию в лабораторных условиях (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что солевая коррозия проникла только на 50 % толщины покрытия и остановилась перед нанесенным на МАП подслоем состава NiCrTaWAlSiHfY, который обладает более высокой стойкостью к коррозии, чем формируемая при хромоалитировании наружная зона, состоящая из β - и γ -фаз.

Результаты исследования подтверждают изложенный выше механизм разрушения защитного покрытия от воздействия продуктов сгорания примесей, находящихся в топливе и воздухе и воздействие агрессивной среды на рабочие лопатки ГТД.

Авторами были проведены лабораторные исследования по влиянию хлористого натрия на защитные покрытия, полученные различным методом. На образцы из никелевого сплава наносили серийно применяемое в авиационной промышленности хромоалитированное покрытие, формируемое в порошках (ХА) и газодиффузионным методом (ЦХА). В качестве альтернативы данным покрытиям было проведено исследование нового покрытия, формируемого из водной суспензии с повышенным содержа-

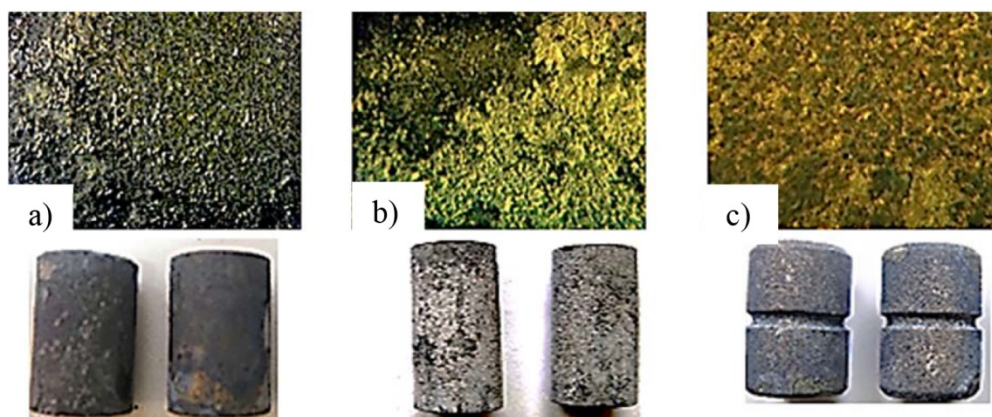


Рис. 4. Структура поверхности и общий вид образцов из сплава ЖС6У с защитными покрытиями: *a* – ХА, *б* – ЦХА, *в* – НПХ после солевой коррозии в течение 100 часов при температуре 1100 °С
Fig. 4. Surface structure and general appearance of samples from the alloy ZhS6U with protective coatings: *a* – HA, *b* – CCA, *c* – NPH after salt corrosion for 100 hours at a temperature of 1100 °С

нием хрома – 10...13 % (НПХ). В процессе термовакуумного отжига в новом покрытии протекает экзотермическая реакция, что и позволило ввести в покрытие хром [19, 20].

На образцы из сплава ЖС6У наносили водный раствор морской соли, который содержит 58 % NaCl, 26,5 % MgCl₂, 9,8 % Na₂SO₄, 2,8 % CaCl₂, 1,6 % KCl, 0,5 % NaHCO₃, 0,2 % KBr. В данный раствор каждый образец окунали не менее 3 раз и сушили на воздухе в течение 15 минут. После чего образцы взвешивали для определения привеса массы соли, которая составила порядка 5 ± 1 мг/см². Испытания проводили при температуре 1100 °С, а в качестве показателей стойкости покрытий к коррозии использовали количество окалина, осыпавшейся с образцов, в тиглях и внешний вид покрытия (рис. 4).

Результаты исследования показали, что по стойкости (изменение внешнего вида) к коррозии (по убыванию) покрытия можно расположить в следующей последовательности: НПХ, ЦХА и ХА (рис. 4). Для оценки по количеству окалина в тигле образцы совместно с тиглями были взвешены. В тигле с НПХ имелось незначительное количество окалина, имеющей белый цвет. По всей видимости, это осыпавшаяся соль с незначительным количеством продуктов коррозии. В тиглях с покрытиями ЦХА и ХА больше количество окалина, которая имеет более темный цвет и более крупный размер.

Исследования подтверждают приведенное выше (формулы (8) и (9)) влияние хлористого

натрия на защитные покрытия. Введение в покрытие хрома около 10 % позволяет как увеличить его стойкость к воздействию газовой коррозии за счет образования оксидной пленки Cr₂O₃, так и повысить сопротивляемость воздействию агрессивных продуктов сгорания.

Выводы

1. Повышение работоспособности лопаток турбины ГТД, длительно работающих в агрессивном газовом потоке, возможно при применении защитных покрытий, позволяющих снизить их склонность к коррозии. Работоспособность применимых на лопатках покрытий зависит от многих факторов, и в первую очередь от его состава.

2. На основании проведенных исследований представлен механизм разрушения защитного покрытия и металла за счет растворения и диффузии серы, попадающей на защитное покрытие лопатки турбины из топлива, в глубь покрытия.

3. Проведенные лабораторные исследования позволили установить влияние хлористого натрия, содержащегося в воздухе и попадающего на поверхность лопатки турбины с продуктами сгорания, на коррозионное разрушение защитного покрытия.

4. Содержания в продуктах сгорания серы, хлористого натрия и ванадия приводит к увеличению скорости коррозии.

5. Легирование покрытия хромом повышает сопротивление коррозии, следовательно, позволяет увеличить долговечность при работе в агрессивных продуктах сгорания.

Список литературы

1. **Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С.** Химико-термическая обработка жаростойких сталей и сплавов. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 622 с.

2. **Мубояджян С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П.** Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. Екатеринбург: Квист, 2008. 208 с.

3. **Никитин В.И.** Коррозия и защита лопаток газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1987. 272 с.

4. **Гишваров А.С.** Повреждаемость материалов энергетических установок в условиях коррозионно-активной среды. М.: Машиностроение, 2014. 297 с.

5. **Коломышев П.Т.** Защитные покрытия для никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1991. 154 с.

6. **Давыдов М.Н., Гишваров А.С., Рахимов А.Х.** Моделирование долговечности лопаток турбин в условиях коррозионно-активной среды // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 1 (71). С. 71–80.

7. **Качанов Е.Б., Тамарин Ю.А.** Покрытия для защиты лопаток турбин от сульфидной коррозии // Технология легких сплавов. 2005. № 1-4. С. 171–180.

8. **Карпинос Б.С., Барило В.Г., Самулеев В.В.** Разрушение элементов горячего тракта авиационных газовых турбин // Вестник двигателестроения. 2004. № 1. С. 4–10.

9. **Ющенко К.А., Савченко В.С.** Высокотемпературная газовая коррозия лопаток турбин из никелевых сплавов в процессе эксплуатации // Автоматическая сварка. 2005. № 5. С. 25–34.

10. **Mahobia G.S.** Effect of hot corrosion on low cycle fatigue behavior of superalloy IN718 / G.S. Mahobia, N. Paulose, S.L. Mannan, R.G. Sudhakar, K. Chattopadhyay, N.C. Santhi Srinivas, V. Singh // International Journal of Fa-

tigue. 2014. Vol. 59. Pp. 272–281. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.08.009

11. **Yang X., Li S., Qi H.** Effect of high-temperature hot corrosion on the low cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-base superalloy // International Journal of Fatigue. 2015. Vol. 70. Pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.011

12. **Зрелов В.Н., Пискунов В.А.** Реактивные двигатели и топливо. М.: Машиностроение, 1986. 293 с.

13. **Химич В.Л., Кузнецов Ю.П.** О механизме солеотложения в проточной части газотурбинного двигателя, работающего в условиях морской среды // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 99.

14. **Грядунов К.И.** Химмотология авиационных горюче-смазочных материалов: тексты лекций. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. 184 с.

15. **Бокштейн Б.С.** Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 248 с.

16. **Wagner C.** Beitrag zur theorie des anlaufvorgangs // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1933. Vol. 21B, no. 1. Pp. 25–41. DOI: 10.1515/zpch-1933-2105

17. **Chaug R., Stewart W., Wagner C.** Diffusion of sulfur 35 NiO and CoO // Proceedings of the International Symposium on Reactivity of Solids. Bristol, 17–21 July 1972. Chapman and Hall, Ltd., 1972. p. 231.

18. **Гильдер Х., Мербиола Р.** Сульфидная коррозия сплавов на основе никеля и кобальта // Жаропрочные сплавы для газовых турбин: материалы международной конференции / Под ред. Д. Котсорадиса, П. Феликса, Х. Фишмайстера и др. М.: Металлургия, 1981. С. 59–79.

19. **Иванов Е.Г.** Новое жаростойкое покрытие / Е.Г. Иванов, А.В. Зоричев, В.М. Самойленко, Г.Т. Пащенко // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2008. № 3. С. 22–24.

20. **Иванов Е.Г.** Применение покрытий из водной суспензии для защиты деталей ГТД от коррозии / Е.Г. Иванов, В.М. Самойленко, Р.Г. Равилов, М.А. Петрова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 217. С. 46–50.

References

1. **Abraimov, N.V. & Eliseev, Yu.S.** (2001). [*Chemical and thermal treatment of heat-resistant steels and alloys*]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 622 p. (in Russian)
2. **Muboyadzhyan, S.A., Lesnikov, V.P. & Kuznetsov, V.P.** (2008). [*Complex protective coatings for turbine blades of aircraft gas turbine engines*]. Yekaterinburg: Kvist, 208 p. (in Russian)
3. **Nikitin, V.I.** (1987). [*Corrosion and protection of gas turbine blades*]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 272 p. (in Russian)
4. **Gishvarov, A.S.** (2014). [*Damage rate of power plants materials in a corrosive environment*]. Moscow: Mashinostroyeniye, 297 p. (in Russian)
5. **Kolomytsev, P.T.** (1991). [*Protective coatings for nickel alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 154 p. (in Russian)
6. **Davydov, M.N., Gishvarov, A.S. & Rahimov, A.H.** (2016). *Modeling of durability of turbine blades in the corrosive environment*. Vestnik UGATU, vol. 20, no. 1 (71), pp. 71–80. (in Russian)
7. **Kachanov, E.B. & Tamarin, Yu.A.** (2005). [*Coatings to protect turbine blades from sulfide corrosion*]. Tekhnologiya legkikh splavov, no. 1-4, pp. 171–180. (in Russian)
8. **Karpinos, B.S., Barilo, V.G. & Samuleev, V.V.** (2004). [*Destruction of elements of the hot path of aviation gas turbines*]. Vestnik dvigatelestroyeniya, no. 1, pp. 4–10. (in Russian)
9. **Yushchenko, K.A. & Savchenko, V.S.** (2005). [*High-temperature gas corrosion of nickel alloy turbine blades during operation*]. Automatic welding, no. 5, pp. 25–34. (in Russian)
10. **Mahobia, G.S., Paulose, N., Mannan, S.L., Sudhakar, R.G., Chattopadhyay, K., Santhi Srinivas, N.C. & Singh, V.** (2014). *Effect of hot corrosion on low cycle fatigue behavior of superalloy IN718*. International Journal of Fatigue, vol. 59, pp. 272–281. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.08.009
11. **Yang, X., Li, S. & Qi, H.** (2015). *Effect of high-temperature hot corrosion on the low cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-base superalloy*. International Journal of Fatigue, vol. 70, pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.011
12. **Matrelov, V.N. & Piskunov, V.A.** (1986). [*Jet engines and fuel*]. Moscow: Mashinostroyeniye, 293 p. (in Russian)
13. **Khimich, V.L. & Kuznetsov, Yu.P.** (2015). *About the mechanism of salt scaling in the flow section of a gas turbine engine operating in the marine environment*. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya, no. 1-1, pp. 99. (in Russian)
14. **Gryadunov, K.I.** (2021). [*Chemmotology of aviation fuels and lubricants: lecture texts*]. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, 184 p. (in Russian)
15. **Bokshtein, B.S.** (1978). [*Diffusion in metals*]. Moscow: Metallurgiya, 248 p. (in Russian)
16. **Wagner, C.** (1933). *Beitrag zur theorie des anlaufvorgangs*. Zeitschrift für Physikalische Chemie, vol. 21B, no. 1, pp. 25–41. DOI: 10.1515/zpch-1933-2105
17. **Chaug, R., Stewart, W. & Wagner, C.** (1972). *Diffusion of sulfur 35 NiO and CoO*. Proceedings of the International Symposium on Reactivity of Solids. Bristol, 17–21 July. Chapman and Hall, Ltd., p. 231.
18. **Gilder, X. & Merbiola, R.** (1981). [*Sulfide corrosion of alloys based on nickel and cobalt*]. Zharoprochnyye splavy dlya gazovykh turbin: materialy mezhdunarodnoy konferentsii, in D. Kotsoradis, P. Felix, H. Fishmeister et al. (Eds.). Moscow: Metallurgiya, pp. 59–79. (in Russian)
19. **Ivanov, E.G., Zorichev, A.V., Samoylenko, V.M. & Pashchenko, G.T.** (2008). [*New heat-resistant coating*]. Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress, no. 3, pp. 22–24. (in Russian)
20. **Ivanov, E.G., Samoylenko, V.M., Ravilov, R.G. & Petrova, M.A.** (2015). *Application of the aqueous coating suspension for the protection of gas turbine engine parts from corrosion*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 217, pp. 46–50. (in Russian)

Сведения об авторах

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.aero.

Пашенко Геннадий Трофимович, кандидат технических наук, начальник управления САУ опытно-конструкторского бюро имени А. Люльки – филиала ПАО «ОДК-УМПО», gennadij.paschenko@okb.umpo.ru.

Самойленко Елизавета Васильевна, студентка механического факультета МГТУ ГА, elizavetta.samojlenko@mail.ru.

Гнездилова Анастасия Александровна, студентка механического факультета МГТУ ГА, nastik.gnez02@gmail.com.

Information about the authors

Vasily M. Samoilenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.samoilenko@mstuca.aero.

Gennady T. Paschenko, Candidate of Technical Sciences, The Head of the ACS Department of the A. Lyulka Experimental Design Bureau – a branch of PJSC UEC-UMPO, gennadij.paschenko@okb.umpo.ru.

Elizaveta V. Samoilenko, Student of the Mechanical Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, elizavetta.samojlenko@mail.ru.

Anastasia A. Gnezdilova, Student of the Mechanical Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, nastik.gnez02@gmail.com.

Поступила в редакцию 09.10.2021
Принята в печать 26.01.2023

Received 09.10.2021
Accepted for publication 26.01.2023