

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 66-2

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ ЗАМКОВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН НАЗЕМНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

© 2021 г. С. А. Наприенко^{1,*}, Е. В. Филонова¹, Е. Б. Чабина¹, Д. С. Горлов¹¹ *Всероссийский институт авиационных материалов, Москва, Россия***e-mail: s.naprienko@gmail.com*

Поступила в редакцию 14.08.2020 г.

После доработки 12.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Детали горячей части наземных газотурбинных установок в процессе эксплуатации испытывают воздействие агрессивной газовой среды, которая отрицательно влияет на долговечность узлов и агрегатов. При анализе эксплуатационных разрушений замков рабочих лопаток из сплава ЖС32-ВИ после работы в составе наземных газотурбинных установок получили, что трещины развиваются в местах активного протекания сульфидно-оксидной коррозии. Показано, что наличие серебра приводит к ускорению коррозионного процесса на замках лопаток. Предложено использование технологических барьерных слоев на основе TiN для защиты поверхностей замков от сульфидно-оксидной коррозии.

Ключевые слова: газотурбинные установки, сульфидно-оксидная коррозия, ЖС32, рабочие лопатки

DOI: 10.31857/S0235711921030123

Детали из жаропрочных никелевых сплавов широко применяются в конструкциях газотурбинных двигателей, а также в изготовленных на их основе наземных газотурбинных установок (ГТУ) [1, 2]. В процессе эксплуатации детали горячей части ГТУ помимо температурно-силового нагружения испытывают воздействие агрессивной газовой среды, содержащей двуокись углерода, сернистые соединения и водяной пар. В связи с этим изучение влияния коррозионно-активных сред на процесс разрушения деталей из никелевых сплавов является актуальной задачей для обеспечения ресурса деталей ГТУ. Исследование склонности материалов к развитию коррозионных процессов можно проводить как в лабораторных условиях [3], так и при анализе эксплуатационных разрушений. Развитие коррозионных повреждений лопаток и дисков ГТУ из никелевых сплавов зависит от структурных особенностей материалов и может ускоряться в присутствии химических элементов, которые являются катализаторами процесса. Коррозионные повреждения служат концентраторами напряжений, от которых впоследствии может развиваться хрупкое разрушение при эксплуатации [4].

Материалы и методы. Исследование проведено на разрушенных в процессе эксплуатации рабочих лопатках турбины высокого давления (ТВД) из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ (время до разрушения порядка 30000 и 10000 часов) и контактной с замками лопаток поверхности межпазовых выступов диска из сплава ЭИ698.

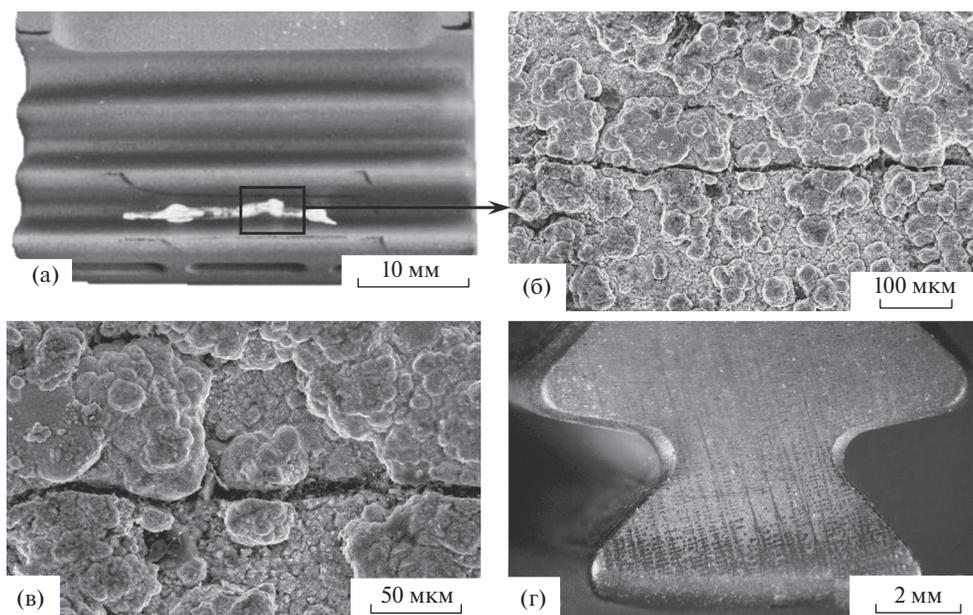


Рис. 1. Поверхность замка лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ после эксплуатации: (а) – общий вид замка; (б), (в) – трещина во впадине третьего зуба; (г) – торец замка лопатки.

Фрактографические и микроструктурные исследования выполнены методом раствовой электронной микроскопии, а также электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА) на электронном микроскопе Zeiss EVO MA10 с приставкой для микроанализа INCA Energy.

Исследование микроструктуры и определение локального элементного состава материала лопатки и диска проведены на микрошлифах, изготовленных в сечениях поперек профиля зубьев.

Результаты исследований. В процессе эксплуатации ГТУ при наработке порядка 30000 часов наблюдаются разрушения замков рабочих лопаток ТВД из сплава ЖС32-ВИ. По результатам исследования во впадине третьего зуба обнаружены трещины, а также множественные скопления образований куполообразной формы разных диаметров, достигающих до 150 мкм (рис. 1а, б, в). Во впадинах первого и второго зубьев наблюдаются аналогичные образования округлой формы, но значительно меньшего размера.

Аналогичные рассеянные округлые образования наблюдаются и на торцах лопаток по всей поверхности, но с преимущественным скоплением вдоль дендритных осей, тем самым выявляя их направление на поверхности (рис. 1г).

Результаты исследования микроструктуры с применением ЭЗМА показали, что микроструктура, химический и фазовый состав материала в зоне, не затронутой коррозионным поражением, соответствует сплаву ЖС32-ВИ (рис. 2а, б, участок б; табл. 1). В γ/γ' матрице наблюдаются карбиды типа МС на основе тантала, ниобия, вольфрама различной морфологии.

Поверхность замка лопатки покрыта сплошной пленкой, состоящей практически полностью из оксида никеля (рис. 2а, участок 1; табл. 1). В местах образования наростов оксидный слой имеет большую толщину и внутри него располагаются слои сульфида никеля (рис. 2а, участок 2; табл. 1).

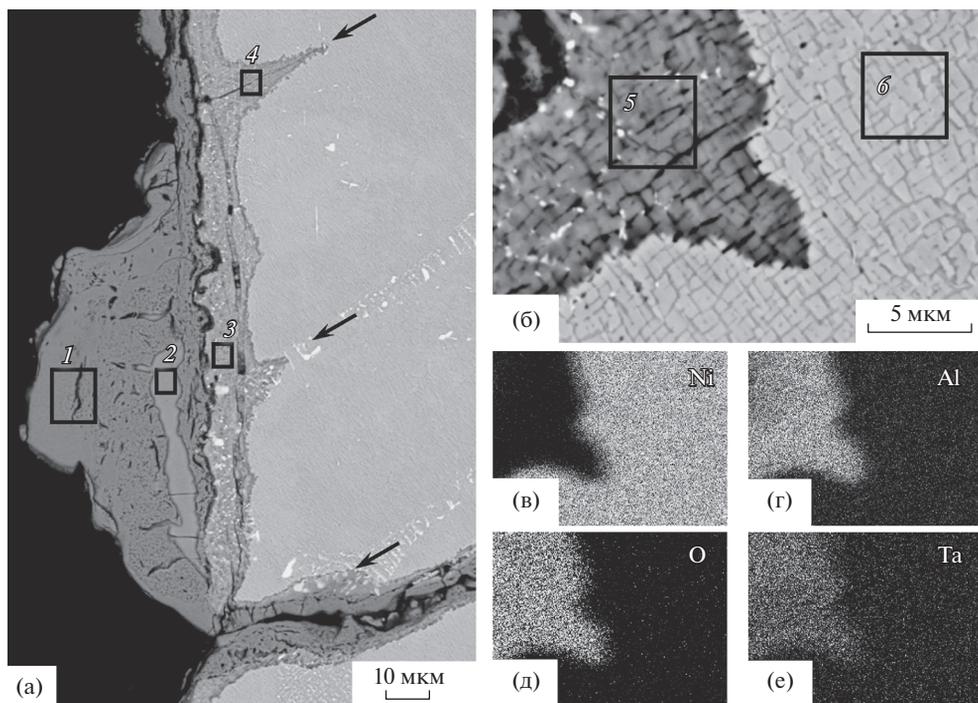


Рис. 2. Микроструктура вблизи поверхности замка лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ после эксплуатации 30000 часов (цифрами указаны участки определения локального элементного состава (табл. 1): (а), (б) – микроструктура замка во впадине третьего зуба вблизи поверхности разрушения (стрелками показаны междендритные области); (в)–(е) – карты распределения никеля, алюминия, кислорода и тантала на участке, представленном на (б).

Под слоем оксида и сульфида никеля расположены сильно обедненные никелем (в 5–7 раз) и обогащенные оксидами алюминия, хрома, тантала и вольфрама области (рис. 2а, участки 3, 4; рис. 2б, участок 5; табл. 1). В этих областях образуются трещины. Участки, от которых развиваются трещины, в основном располагаются в междендритных областях вдоль карбидной фазы (рис. 2, отмечены стрелками).

Таблица 1. Результаты определения локального элементного состава участков замка лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ (рис. 2)

№	Содержание элементов, % масс										Σ, % масс
	Ni	Al	Cr	Co	Nb	Mo	Ta	W	Re	S	
1	69.6	0.2	1.3	2.1	н/о	0.7	н/о	0.4	н/о	1.0	80.6*
2	69.2	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	30.7	99.9
3	8.8	12.5	7.9	6.1	3.9	2.2	8.6	15.6	4.9	1.4	78.0*
4	12.6	13.1	7.8	5.5	2.1	1.3	7.1	16.8	3.9	2.6	78.4*
5	5.0	17.4	7.9	5.8	2.7	1.6	8.3	17.1	2.5	3.3	76.7*
6	59.1	6.7	4.5	8.9	1.0	0.9	2.6	7.3	2.8	н/о	98.8

* По данным качественного анализа присутствует кислород.

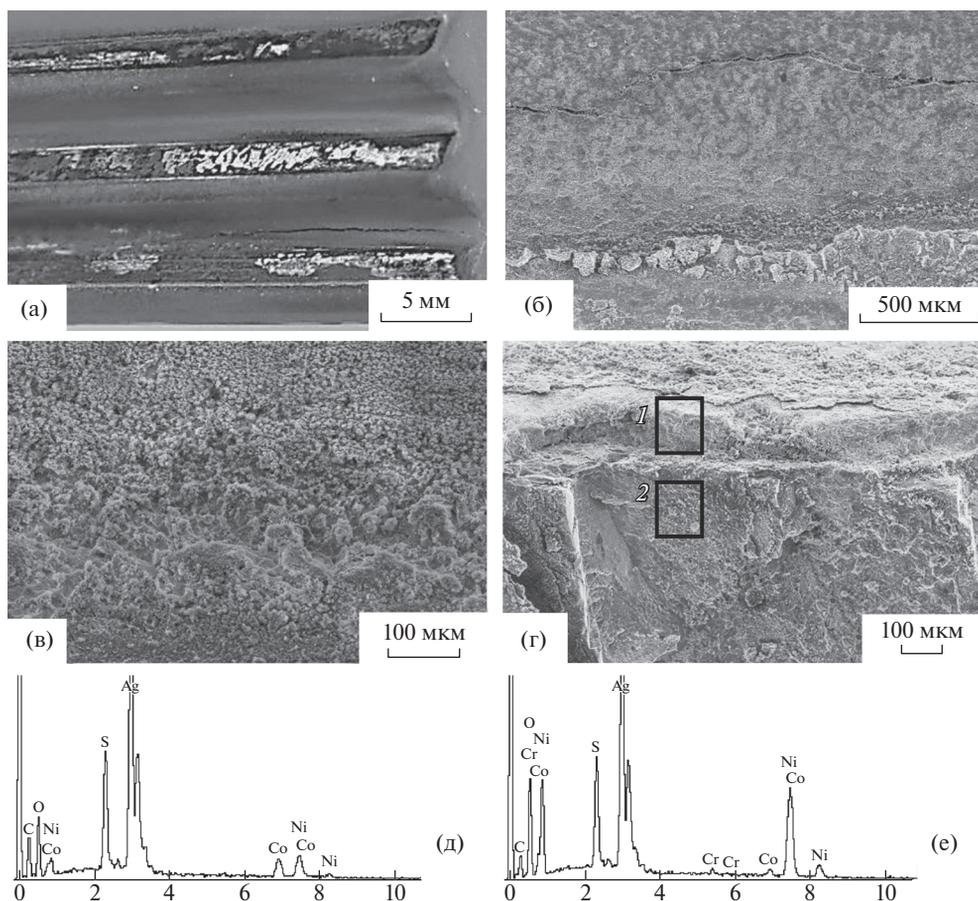


Рис. 3. Поверхность замка лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ после эксплуатации около 10000 часов: (а) – общий вид замка; (б) – трещина во впадине третьего зуба; (в) – продукты окисления на поверхности замка; (г) – место перехода поверхности лопатки (сверху) в поверхность излома (снизу); (д), (е) – результаты качественного ЭЗМА на участках 1 и 2.

Результаты исследования разрушений замков рабочих лопаток из сплава ЖС32-ВИ, проработавших менее 10000 часов, показали, что они носят схожий характер с лопатками, разрушенными после наработки 30000 часов.

Поверхности замков имеют темно-серый цвет (рис. 3а). Во впадине третьего зуба наблюдаются трещины (рис. 3а, б). На поверхности замка наблюдается большое количество отложений продуктов окисления (рис. 3б, в). При вскрытии эксплуатационной трещины методом качественного ЭЗМА выявлено, что на поверхности изломов и на поверхности замков вблизи излома помимо легирующих элементов сплава наблюдаются Ag, S, O (рис. 3г, д, е).

Исследования микроструктуры, проведенные на микрошлифах, показали, что поверхностный слой на замках представляет собой смесь оксидов, в основном наблюдается оксид никеля (рис. 4; табл. 2).

На отдельных участках под слоем оксида никеля наблюдается слой, содержащий серебро (рис. 4а). Соединения на основе серебра наблюдаются не только на поверхно-

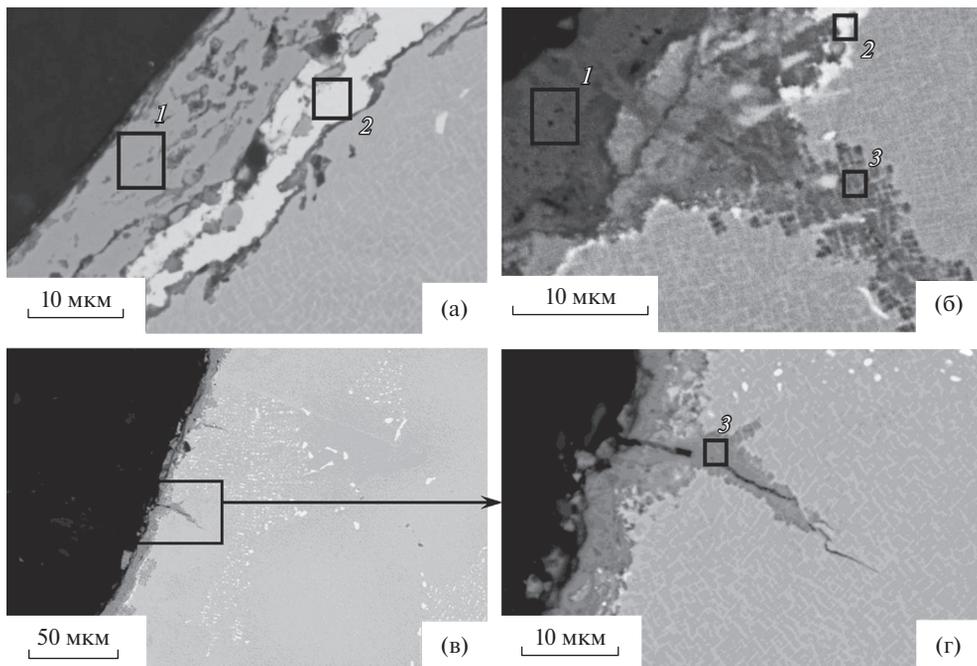


Рис. 4. Микроструктура вблизи поверхности замка лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ после эксплуатации 10000 часов (цифрами указаны участки определения локального элементного состава (табл. 2)): (а) – микроструктура замка в месте, где наблюдаются участки, содержащие серебро; (б)–(г) – микроструктура замка во впадине третьего зуба вблизи места разрушения.

сти и в окисленных слоях, но и в материале сплава под окисленным слоем (рис. 4б, в; табл. 2).

Под оксидным слоем имеется измененный слой материала, состоящий из обедненной легирующими элементами основы сплава с включениями мелких частиц сульфида никеля. Между оксидным и измененным слоями присутствует переходный слой, представляющий собой частицы сплава, обедненного легкоокисляющимися легирующими элементами (Al, Cr, Ti), окруженные частицами оксидов и сульфидов. Также в этих местах происходит образование трещин (рис. 4б–г).

Участки, в которых более интенсивно протекают коррозионные процессы и развиваются трещины, располагаются в междендритных областях (рис. 4в, г).

Таблица 2. Результаты определения локального элементного состава участков замка лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ (рис. 4)

№ участка	Содержание элементов, % масс.											Σ % масс.
	Ni	Al	Cr	Co	Nb	Mo	Ta	W	Re	S	Ag	
1	66.9	н/о	1.8	4.2	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	73.1*
2	17.6	н/о	н/о	1.0	н/о	н/о	н/о	8.7	н/о	3.4	68.9	99.6
3	16.6	12.2	12.8	7.5	2.2	1.7	7.3	11.5	5.8	н/о	н/о	77.6*

*По данным качественного анализа присутствует кислород.

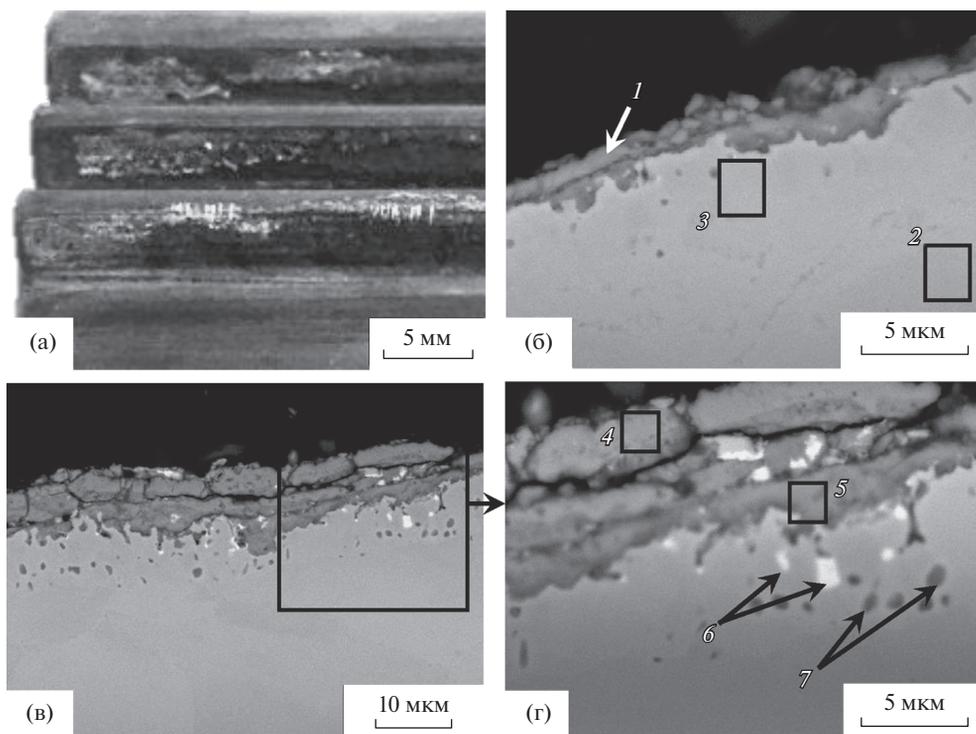


Рис. 5. Поверхность и микроструктура межпазового выступа-диска из сплава ЭИ698 после эксплуатации (цифрами указаны участки определения локального элементного состава (табл. 3)): (а) – поверхность межпазового выступа; (б) – микроструктура у поверхности вдали от мест контакта с лопаткой; (в)–(г) – микроструктура у поверхности вблизи от мест контакта с лопаткой.

Помимо исследования лопаток были проведены исследования поверхности и микроструктуры материала диска из сплава ЭИ698 вблизи поверхности на межпазовом выступе, расположенном между лопатками.

Поверхность межпазового выступа окислена до темно-серого цвета. На рабочих гранях межпазового выступа в местах контакта с замками лопаток наблюдаются участки светло-коричневого цвета (рис. 5а).

На поверхности диска наблюдается тонкий (≈ 2 мкм) слой оксида никеля с хромом (рис. 5б, точка 1; табл. 3). Сплав под поверхностным слоем оксидов обеднен алюминием и хромом (рис. 5б, точка 3; табл. 3).

В местах поверхности, где происходил контакт диска с лопатками, наблюдаются зоны коррозионного поражения (рис. 5в, г; табл. 3), в которых имеется сложный оксидный слой (внешний – участок 4 и внутренний – участок 5) общей толщиной ≈ 10 мкм. В состав оксидов входят практически все элементы, содержащиеся в сплаве. Во внутреннем оксидном слое также обнаружены серебро и сера. В зоне коррозионного поражения обнаружены частицы серебра, содержащие никель и хром (точка 6). Под слоем оксидов наблюдаются сульфиды на основе никеля и хрома (точка 7).

В отдельных зонах коррозионного поражения частиц на основе серебра не наблюдается, но сера и серебро содержатся в составе оксидного слоя. Под оксидным слоем в материале обнаружены сульфиды на основе никеля и хрома, что свидетельствует о протекании коррозионных процессов.

Таблица 3. Результаты определения локального элементного анализа участков межпазового выступа-диска из сплава ЭИ698 (рис. 5)

№	Содержание элементов, % масс										Σ, % масс
	Al	S	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	Ag	
1	н/о	н/о	н/о	2.1	н/о	н/о	73.3	н/о	н/о	н/о	75.6*
2	2.2	н/о	2.7	15.1	н/о	н/о	74.6	2.5	2.9	н/о	100
3	1.7	н/о	2.4	11.2	н/о	н/о	79.0	2.4	3.1	н/о	99.8
4	н/о	н/о	н/о	0.7	н/о	н/о	74.6	н/о	н/о	н/о	75.3*
5	3.0	0.9	7.7	27.8	0.8	1.9	23.8	3.2	1.0	3.2	73.3
6	н/о	н/о	н/о	1.8	н/о	н/о	12.4	н/о	н/о	86.1	100.3
7	н/о	18.9	4.3	19.0	н/о	н/о	57.9	н/о	н/о	н/о	100.1

* По данным качественного анализа присутствует кислород.

Анализ полученных результатов. Результаты выполненных исследований разрушенных лопаток показывают, что причиной эксплуатационных разрушений замков рабочих лопаток ТВД наземных ГТУ является развитие коррозионных процессов на поверхности жаропрочного сплава в зоне замка. Наибольшее развитие коррозионных процессов происходит в междендритных областях материала замков. Это связано с повышенным содержанием алюминия и наличием карбидной фазы в междендритных областях [5, 6], что, как известно, понижает сопротивление к сульфидно-оксидной коррозии жаропрочных никелевых сплавов, которая возникает при температурах выше 600°C [7–13]. Повышенное содержание алюминия в междендритных областях отливок из жаропрочного никелевого сплава обусловлено его ликвацией в процессе направленной кристаллизации.

Серебро легко вступает в соединение с серой с образованием Ag_2S и начинает взаимодействовать с сернистыми соединениями даже без нагрева [14, 15]. При сборке ГТУ в отдельных узлах используется серебрение в качестве антифреттингового покрытия (например, при посадке титанового диска на вал). Вероятно, серебро могло попасть на поверхность лопаток из жаропрочного никелевого сплава в результате сбоя в ходе процесса сборки ГТУ.

Образовавшийся на поверхности лопаток слой сульфида серебра в ходе эксплуатации при рабочих температурах значительно более высоких, чем 600°C, находится в постоянном контакте с материалом лопатки, в результате чего протекают коррозионные процессы уже в жаропрочном сплаве с образованием сульфидов. Это наглядно представлено при исследовании поверхности межпазового выступа на диске. В местах, где отсутствовал контакт с серебром, наблюдается тонкий окисленный слой толщиной ~2 мкм. В местах, где было взаимодействие с серебром, наблюдается сульфидно-оксидная коррозия, коррозионные процессы интенсифицируются.

В связи с тем, что образование трещин на замках рабочих лопаток турбины высокого давления из сплава ЖС32-ВИ от коррозионных повреждений обнаружены впервые, исследование возможности защиты поверхности замков рабочих лопаток ТВД от воздействия сульфидно-оксидной коррозии является актуальной задачей.

В мировой практике покрытия для защиты поверхностей замков рабочих лопаток турбины ГТУ до настоящего времени широко не применялись. Работы, связанные с нанесением защитных покрытий на поверхности замков в основном связаны с технологическими операциями при стадиях нанесения жаростойких и коррозионностойких покрытий (алитирование, хромирование и др.). Известны способы защиты участков поверхности изделий, на которых не допускается присутствие диффузионных покры-

тий, формируемых на рабочих поверхностях этих изделий в процессе их химико-термической обработки, путем нанесения на эти участки технологического покрытия, при этом остальные поверхности изделия защищаются специальным устройством, представляющим собой систему экранов [16].

Способ нанесения технологического покрытия из нитрида титана (TiN) выгодно отличается от известных способов местной защиты поверхностей обрабатываемых изделий своей надежностью и защитной способностью, высокой сплошностью и адгезионной прочностью покрытия TiN с подложкой и в то же время своей инертностью по отношению к рабочей газовой среде, создаваемой при химико-термической обработке изделий; высокой технологичностью нанесения покрытия TiN.

Высокая защитная способность покрытия TiN, используемая по способу, предложенному в патенте [17], обеспечивается тонким сплошным слоем такого покрытия (в среднем 5–7 мкм), кристаллическая решетка которого является мощным диффузионным барьером для насыщающих элементов (Al, Cr и др.), формирующих жаростойкое диффузионное покрытие на рабочих поверхностях лопаток.

В качестве альтернативы барьерному слою из TiN возможно рассмотреть технологические покрытия, формируемые при помощи плазмохимической реакции при распылении материалов (Ti, Cr).

Выводы. 1. Очагами зарождения эксплуатационных трещин в замках рабочих лопаток турбины ГТУ из сплава ЖС32-ВИ являются коррозионные повреждения поверхности замков, образовавшиеся в результате сульфидно-оксидной коррозии и расположенные в междендритных областях. 2. Попадание серебра на поверхность замков рабочих лопаток ускоряет процесс сульфидно-оксидной коррозии. 3. Необходимо разработать способ защиты поверхностей замков от сульфидно-оксидной коррозии, в основе которого возможно применение технологических барьерных слоев.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.595.21.0002, с использованием оборудования ЦКП “Климатические испытания ФГУП “ВИАМ””.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Часть I // *Материаловедение*. 1997. № 4. С. 32.
2. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 72. <https://doi.org/10-2071-9140-2017-0-S-72-103>.
3. Медведев И.М., Никитин Я.Ю., Пузанов А.И., Лаптев А.Б. Методы испытаний жаропрочных сплавов на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. № 11. С. 93. <http://www.viam-works.ru>. <https://doi.org/2307-6046-2018-0-11-93-100>
4. Наприенко С.А., Орлов М.Р. Разрушение монокристаллических лопаток турбины наземных ГТУ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. № 2. С. 03. <http://www.viam-works.ru>. <https://doi.org/2307-6046-2016-0-2-3-3>.
5. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Чабина Е.Б. Влияние режимов роста на структуру и ликвационную неоднородность монокристаллов никелевого жаропрочного сплав ЖС36 // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005. № 5. С. 203.

6. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Орехов Н.Г., Остроухова Г.А. Структура и ростовые дефекты монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 5. С. 190.
7. Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Физико-химические и структурные характеристики жаропрочных никелевых сплавов // Металлы. 2001. № 2. С. 63.
8. Данилов Д.В., Шмотин Ю.Н., Логунов А.В., Лещенко И.А. Разработка жаропрочного никелевого суперсплава стойкого к высокотемпературной солевой коррозии // Сб. трудов X Международной конференции по гидроавиации “Гидроавиасалон-2014”. 2014. С. 207.
9. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Морозова Г.И. Физико-химические факторы жаропрочности никелевых сплавов, содержащих рений // сб. Литейные жаропрочные сплавы “Эффект С.Т. Кишкина”. М.: Наука. 2006. 116 с.
10. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток турбин // М.: Машиностроение. 1987. 272 с.
11. Космин А.А., Будиновский С.А., Матвеев П.В., Смирнов А.А. Исследование жаропрочного сплава ЖС36 с различными типами ионно-плазменных защитных покрытий на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии в области температур 850–900°C // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. № 12. С. 05. <http://www.viam-works.ru>. <https://doi.org/2307-6046-2015-0-12-5-5>
12. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Космин А.А. Ионно-плазменные покрытия для защиты лопаток промышленных турбин от сульфидно-оксидной коррозии // Наука и техника в газовой промышленности. 2010. № 3 (43). С. 61.
13. Смирнов А.А., Будиновский С.А. Повышение жаростойкости конденсационно-диффузионных покрытий для лопаток турбин из сплава ЖС32 // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 2. С. 3. <https://doi.org/2071-9140-2016-0-2-3-10>.
14. Малышев В.М., Румянцев Д.В. Серебро. 2-е изд. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
15. Пятницкий И.В., Сухан В.В. Аналитическая химия серебра. М.: Наука, 1975. 264 с.
16. Елисеев Ю.С., Душкин А.М., Шкретов Ю.П., Абраимов Н.В., Гришин Г.С., Терехин А.М. Способ защиты участков поверхности детали. РФ Патент 2232205, 2002.
17. Елисеев Ю.С., Мулякаев Л.М., Шпажников И.А., Мурышкин С.А., Никитин В.Г. Способ обработки изделий из жаропрочных сплавов. РФ Патент 2464350, 2012.