

УДК 621.735

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНУЮ ГАЗОВУЮ КОРРОЗИЮ

А. С. Гишваров¹, М. Н. Давыдов²

¹ad@mail.rb.ru, ²ad@mail.rb.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 30 декабря 2014 г.

Аннотация. Рассмотрены особенности существующих методов испытаний лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию и проведен сравнительный анализ их эффективности.

Ключевые слова: повреждаемость; лопатка турбины; высокотемпературная газовая коррозия; методы испытаний; материалы ГТД.

Анализ авиационных происшествий по причинам отказа авиационной техники свидетельствует, что 30...70 % происходит по причине отказа двигателей. В свою очередь, 35...50 % от общего количества обнаруживаемых в двигателе дефектов приходится на элементы горячего тракта, из которых на камеры сгорания 28 %, на лопатки сопловых аппаратов 20 %, на рабочие лопатки 25 %.

Элементы «горячей» части (рабочие и сопловые лопатки, диски и т. д.) подвержены действию статических, циклических, повторно-статических нагрузок, а также высокотемпературной газовой коррозии [1].

Высокотемпературная газовая коррозия в некоторых случаях приводит к разрушению лопаток турбины в течение нескольких сот часов работы (рис. 1).

Надежность лопаток турбин в условиях их работы в высокотемпературной газовой среде оценивается экспериментально проведением испытаний на различных стендах и установках.

В настоящее время существует несколько методов испытаний лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию: испытания лопаток в системе двигателя [1–4]; автономные испытания лопаток на стендах [5–8]; испытания лопаток в тиглях в расплавах солей [9–14]; испытания лопаток в расплавах солей с электрохимическим воздействием [15–18]; испытания лопаток с предварительным нанесением на их поверхность коррозионной обмазки [19–23].

Все перечисленные методы испытаний лопаток, за исключением первого метода, относятся к виду ускоренных испытаний.

1. ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК В СИСТЕМЕ ДВИГАТЕЛЯ

В данном случае в испытаниях наиболее полно воспроизводится их эксплуатационная повреждаемость. Примером являются ускоренные испытания рабочих лопаток, установленных непосредственно на двигателе, каждый цикл нагружения которых проводят при форсированной температуре газа перед турбиной, катализатор подают путем искусственного повышения концентрации серы в топливе до 1,5...2,0 %, а подачу на поверхность лопаток 10 % раствора хлористого натрия осуществляют при холодной прокрутке двигателя через специальные форсунки, питаемые от отдельной емкости [24].

В таких испытаниях обеспечивается разрушение лопаток, эквивалентное разупрочнению, получаемому в эксплуатационных условиях. Повышение процентного содержания серы в топливе до 1,5...2,0 % наиболее эффективно, и не изменяет физической сущности процесса, а добавление в тракт двигателя хлористого натрия ускоряет «холодную» коррозию лопаток. Повышение, по сравнению с эксплуатационной, температуры газов перед турбиной значительно ускоряет процесс разрушения лопаток.

В некоторых случаях, для получения условий, соответствующих различным скоростям и высотам полета, испытания проводят на открытых стендах, представляющих собой большие комплексы на базе специального оборудования [3]. Эти комплексы имеют сложные системы, дорогостоящее оборудование, требуют больших площадей, а их строительство и эксплуатация связаны с огромными капитальными затратами.

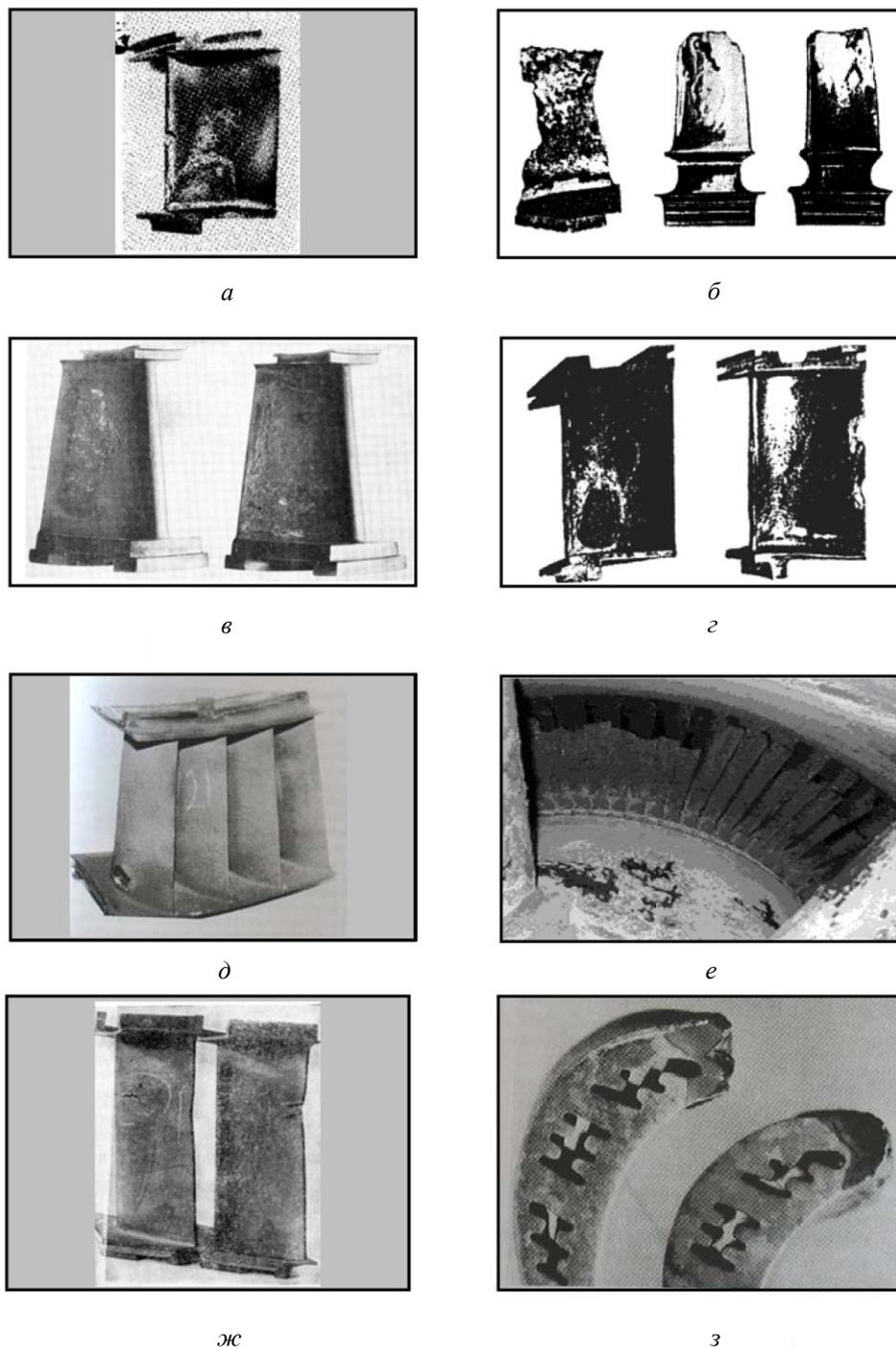


Рис. 1. Виды повреждений лопаток турбин, подверженных высокотемпературной газовой коррозии: *а* – лопатка соплового аппарата ТВД ГТК-10; *б* – рабочие лопатки I ступени турбины MS 5001; *в* – сопловые лопатки I ступени турбины энергетической установки ГТ-100; *г* – сопловые лопатки I ступени турбины ТВД ГТУ; *д* – лопатки соплового аппарата I ступени вентилятора двигателя Д-18Т; *е* – рабочие лопатки III ступени турбины газотурбинной установки МВ6001; *ж* – сопловые лопатки турбины; *з* – входные кромки рабочих лопаток I ступени турбины двигателя Д-336

2. АВТОНОМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СТЕНДАХ.

В данном случае испытания проводятся преимущественно на газодинамических стендах

[3]. Различные модификации стендов и вспомогательных систем позволяют моделировать температурные условия работы лопаток, в том числе установившиеся и неуставившиеся тепловые режимы их работы в высокотемпературном газовом потоке, кратковременное и длительное

статическое и динамическое воздействие механической нагрузки на лопатки, агрессивное воздействие химически активных сред, термонапряженное состояние лопаток в целом и отдельных наиболее напряженных их зон при использовании образцов простой формы [3, 5, 25].

Максимальная температура газового потока может составлять 1500° С без дополнительной подачи кислорода; с дополнительной подачей кислорода – 2500° С. Максимальное давление воздуха 0,8 МПа, расход воздуха 1,2 кг/с. В зависимости от цели испытания используются приставки, обеспечивающие необходимые параметры газового потока, который представляет собой продукты сгорания керосина или дизельного топлива в воздухе, содержащие введенные в поток агрессивные компоненты: кислород, водные растворы солей морской воды, серосодержащие добавки различной концентрации, растворенные в топливе.

Генерирование газового потока осуществляется в камере сгорания авиационного типа, оснащенной комплексом систем и агрегатов, которые обеспечивают работу в различных режимах.

В зависимости от цели испытаний, необходимости моделирования условий работы используется несколько вариантов стендов, имеющих общую систему воздухо- и топливоподачи, централизованную систему управления их работой. Так, например [3], для моделирования условий работы охлаждаемых и неохлаждаемых сопловых лопаток турбин, а также образцов из металлокерамических, литых и деформируемых металлических материалов используется стенд, позволяющий генерировать максимальную температуру газового потока до 1700° С.

Для исследования термической усталости рабочих лопаток турбин и их моделей при переменных тепловых и механических статических нагружениях используется стенд при максимальной температуре газового потока 1300° С. Другой стенд используется для исследования термоциклической долговечности клиновидных образцов, моделирующих термонапряженное состояние наиболее нагруженных зон элементов конструкций (кромки лопаток ГТД) [3].

Для некоторых видов испытаний образцов из тугоплавких материалов с покрытиями используется специальная приставка к камере сгорания, состоящая из отсека с форсункой, охлаждаемой водой. Введение в газовый поток с температурой 1300...1600° С дополнительного (вторичного) топлива и сжигание его в специальной графитовой камере, теплоизолированной

с помощью засыпки сажи, позволяют повысить температуру газового потока до 2500° С. Максимальные скорости газового потока изменяются в зависимости от назначения и конструкции испытательной камеры, однако не превосходят звуковой скорости более чем в 1,5 раза во всех вариантах стендов.

Для моделирования процессов разрушения лопаток при циклических теплосменах в агрессивном газовом потоке применяются газодинамические стенды, где возможно возбуждение в образцах заданных термонапряженных и тепловых состояний с заданной неоднородностью полей. Установки моделируют воздействие газовых сред по величинам тепловых потоков, коррозионно-эрозионному их влиянию на материал образца или элемента конструкции, осуществляют сложные программы теплового нагружения исследуемых объектов, моделирующих широкий диапазон неустановившихся тепловых воздействий и переходных режимов работы двигателей, их наиболее напряженных элементов.

Существуют также упрощенные методики ускоренных испытаний лопаток турбин на газовую коррозию [24, 26]:

- исследуемая лопатка закрепляется в трубе и подвергается циклическому обдуву газовым потоком с последующим охлаждением;
- испытания лопаток также проводят посредством циклического обдува газовым потоком, но в отличие от первого метода, при последующем охлаждении, с целью сокращения времени испытаний и уменьшения их стоимости, на поверхность лопаток предварительно наносят катализатор из серноокислого натрия и одновременно с обдувом нагружают их растягивающим усилием и после каждых пяти циклов нагружения выдерживают в 10-процентном растворе хлористого натрия в течение 24 часов.

3. ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК В РАСПЛАВАХ СОЛЕЙ

Данный вид испытаний наиболее широко распространен в практике испытаний материалов [13, 16, 27–31].

При испытаниях в тиглях образец целиком или частично погружается в сосуд с расплавленной солью, например Na_2SO_4 , или смесью $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--NaCl}$ при повышенной температуре. Газы могут проходить непосредственно через расплав или проходить над ним для создания окислительной или восстановительной среды. Дальнейшие вариации могут включать попеременно погружение и удаление образца из расплава.

Возможны испытания с непрерывным контактом солевой смеси с испытываемыми материалами, что достигается применением различных приспособлений, регулирующих высоту размещения материалов в тигле [27].

Приведем несколько примеров испытаний лопаток в расплавах солей. В работах [21, 23] авторами исследовалась высокотемпературная солевая коррозия никель-карбидных эвтектических сплавов:

- испытания образцов сплавов проводили в лабораторных условиях (по четыре образца на точку);

- цилиндрические образцы помещали в корундовые тигли и засыпали 3 г смеси солей (25 % NaCl и 75 % Na₂SO₄) до половины образца;

- далее тигли с образцами помещали в печь с воздушной атмосферой и нагревали 24 ч при 900° С. Продукты коррозии (окалину) удаляли с поверхности образцов механическим скалыванием или многократным смыванием в дистиллированной воде с последующим выпариванием осадков и измельчением их для рентгеноструктурного анализа.

Коррозионную стойкость оценивали по глубине проникновения коррозии и по потере массы после удаления окалины.

Толщину слоя окалины определяли по разности диаметров исходного и обработанного в печи образца. Глубину внутреннего слоя окалины измеряли металлографически на поперечных шлифах.

В работе [20] авторами рассмотрен метод ускоренной оценки коррозионной стойкости материалов, разработанный в ЦКТИ им. И. И. Ползунова, для испытаний в средах повышенной агрессивности – в смесях солей и окислов металлов, имитирующих золотые отложения на лопатках газовых турбин. В данном методе цилиндриче-

ские и плоские образцы помещаются вертикально в фарфоровые тигли и засыпаются синтетической золой (табл. 1) до половины высоты.

Оценку результатов испытаний проводят по величине потери массы, отнесенной к единице поверхности образцов.

В работах [16, 29] рассмотрен метод, основанный на принципе окисления материала в присутствии тонкой жидкой пленки соли, непрерывно поддерживаемой на образце во время испытания вследствие испарения солей с зеркала тигля и их конденсации на металле, а также вследствие вползания расплава на образец по смачиваемой окалине. Предварительно образец покрывают солями путем нагрева их над газовой плитой в течение 40...60 с и кратковременного погружения (на 0,5...1 с) в 25 % водный раствор соли. Подготовленный таким путем образец выдерживают 5 ч при температуре 900 °С при частичном погружении в расплав. По центру цилиндрического корундового тигля вертикально ставят на дно образец (рис. 1, а).

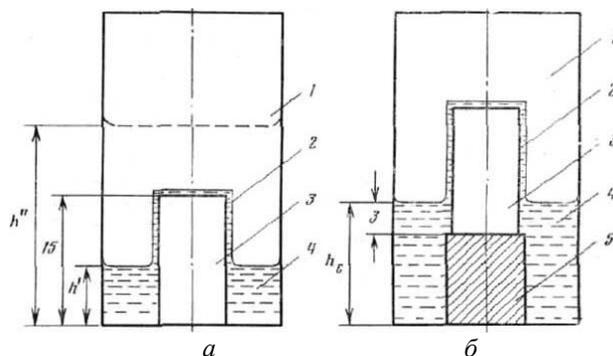


Рис. 1. Установка для испытания образцов на высокотемпературную солевую коррозию: а – на дно тигля; б – на корундовую вставку; 1 – тигель; 2 – пленка соли; 3 – образец; 4 – расплав соли; 5 – вставка; h' , h'' , h_c – уровни соли в тигле

Таблица 1

№ п/п	Содержание компонентов, %							
	Na ₂ SO ₄		NaCl	CaO	Fe ₂ O ₃		NiO	MgO
1	80		–	7	10		2	1
2	70		10	7	10		2	1
	NaCl	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	Ca ₂ SO ₄	Fe ₂ O ₃	MgSO ₄	BaCl ₂	MgCl ₃
3	100	–	–	–	–	–	–	–
4	–	100	–	–	–	–	–	–
5	–	–	100	–	–	–	–	–
6	10	90	–	–	–	–	–	–
7	–	–	–	20	20	20	20	20
8	–	–	–	25	–	25	25	25

Соль и значительную часть окалины с образцов удаляют кипячением в воде. Остатки окалины стравливают в расплавленной эвтектике NaOH и KOH при 320 °С и выдержке 2...3 ч.

Оценку стойкости материала против ВСК проводят по двум показателям: средней скорости убыли массы V_q и проникновения коррозии в глубь металла V_h , определяемым по формулам:

$$V_q = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}; \quad V_h = \frac{\delta + h}{\tau},$$

где Δm – изменение массы материала, мг; S – площадь образца, см²; δ – габаритное утонение материала (полуразность начального и конечного диаметров, мм); h – суммарная глубина коррозионных язв и обедненной зоны, определяемая металлографически на срезе образца, мм; τ – длительность испытания, ч.

Данный способ испытаний относительно прост и не требует больших затрат и наиболее пригоден для проведения сравнительных испытаний.

В работах [9, 10] авторами рассмотрена методика ускоренных коррозионных испытаний сплава ЦНК-7П с покрытием Al-Si. В данном методе используется синтетическая зола состава: Na₂SO₄ – 48 %, Fe₂O₃ – 10 %, NaCl – 17 %, V₂O₅ – 5 %, CaCl₂ – 5 %, MgSO₄ – 15 %. Исследуемые образцы размещаются над золой на расстоянии 20 мм. Тигель помещается в электрическую печь, длительность испытаний составляет 8...10 часов. Достоинством данного метода является небольшая длительность испытаний. Метод наиболее приемлем для сравнительных испытаний, например, при проведении исследований по оптимизации ремонтных технологий и др.

4. ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК В РАСПЛАВАХ СОЛЕЙ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

В основе испытаний с электрохимическим воздействием в расплавах солей лежит метод анодного растворения металлов [2, 32–34]. Анодное растворение металла при электрохимической обработке происходит в специфических условиях очень малых расстояний между анодом и катодом, очень высоких плотностей тока, быстрого потока раствора электролита в межэлектродном пространстве.

При электрохимических испытаниях образцы подвергаются воздействию той же среды, что и при испытаниях в тиглях (соли щелочных металлов: сульфаты, сульфиды, хлориды) [34–38]. Установка для этих испытаний состоит

из электрохимической ячейки с расплавленной солью в качестве электролита, электрода сравнения, рабочего электрода и вспомогательных электродов. Цель эксперимента – исследовать свойства смеси солей или установить коррозионную стойкость рабочих электродов-образцов. При всех таких измерениях существенную роль играет надежный электрод сравнения [2]. Также электрохимические испытания применяются для ускоренного определения электрохимического состояния коррозионно-стойких материалов в агрессивной среде [33, 39] и скорости коррозии в агрессивной среде [40].

В простейшем опыте напряжение в ячейке может быть представлено как функция времени относительно некоторого электрода сравнения. Как и при коррозии в водных растворах, потенциал, установленный корродирующим электродом в расплавленной соли, определяется балансом анодных и катодных коррозионных реакций, так что результирующий ток равен нулю, т. е. электрохимический ток равен внешнему току. Напряжение в ячейке определялось в большинстве случаев скорее кинетическими, а не термодинамическими процессами. Поэтому наиболее правильная интерпретация таких напряжений – теория смешанных потенциалов. Однако с целью предварительного отбора серии сплавов можно установить полезную эмпирическую корреляцию между напряжением в ячейке и сопротивлением коррозии, определенными при испытаниях в тиглях и других испытаниях.

В несколько более усложненных опытах связь между электрохимическим потенциалом (напряжением) и током можно исследовать с помощью трехэлектродной установки [33]. В данном случае в качестве независимой переменной выбирают потенциал или ток. Результаты осциллографических потенциодинамических измерений могут быть использованы в качестве основы для отбора материалов, например, совместимых с расплавленными карбонатами и сульфатами [35].

Для увеличения эффективности испытаний (снижение рабочих плотностей тока) и расширения диапазона испытываемых материалов (труднообрабатываемые сплавы) используются различные добавки [41].

5. ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАНЕСЕНИЕМ КОРРОЗИОННОЙ ОБМАЗКИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ

Данный метод используется для исследования кинетики коррозии металлов в солевой или золотой агрессивной смеси. Отличается от испытаний в тигле тем, что агрессивную смесь наносят непосредственно на исследуемые об-

разцы. Например, в работе [22] исследовалась высокотемпературная коррозия сплавов на основе никеля с использованием образцов на основе NaCl и Na₂SO₄.

Закономерности сульфидно-оксидной коррозии никелевых сплавов ЖС6К, ЭИ893, ЭИ893Л и ЭП800 и стали ЭП164 исследовались в золе газотурбинного топлива, содержащем 66,2 % Na₂SO₄; 1,8 % V₂O₅; 20,4 % Fe₂O₃; 8,3 % NiO и 3,3 % CaO, и в воздушной среде [20, 39]. Результаты испытаний показали, что степень сульфидно-оксидной коррозии материалов значительно больше, чем степень их окисления.

В работе [19] предложен способ испытания на жаропрочность аустенитных хромоникелевых сталей в продуктах сгорания высокосернистых мазутов. Для лабораторной имитации условий контакта металла с продуктами сгорания высокосернистого мазута образцы помещают в контейнеры, где циркулируется газовая среда состава (%): 13 CO₂; 3 O₂; 0,15 SO₂; 11H₂O; остальное – азот. Периодически на образцы наносят синтетическую обмазку состава (%): 25V₂O₅; 50Na₂SO₄; 10Fe₂O₃; 5Cr₂O₃; 3FeO; 2CaO; 1,5MgO. Для получения картины полук количественного распределения элементов снимают рас-

творные изображения во вторичных электронах и в рентгеновских лучах. Количественные результаты по зональному распределению элементов между отдельными слоями получают при сканировании образца под электронным зондом. Анализ отдельных участков и фаз проводят точечным электронным зондом.

Результаты сравнительного анализа методов испытаний лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию приведены в табл. 2.

Метод 1 отличается высокой достоверностью оценки коррозионной стойкости, однако такие испытания требуют больших временных и материальных затрат и, следовательно, являются экономически невыгодными.

Метод 2 позволяет получать результаты, близкие к эксплуатационным, но требует сложного, трудоемкого и дорогого оборудования.

Преимуществом методов 3, 4 и 5 является простота и экономичность испытаний, возможность получения кинетических и температурных зависимостей коррозионной стойкости сплавов, но при этом проблемой является воспроизведение реального процесса коррозии, и методы наиболее приемлемы для проведения сравнительных испытаний.

Таблица 2

Метод испытаний	Преимущества	Недостатки
1. Натурные испытания лопаток в системе двигателя (Гишваров А. С., Тютюнов В. А., Леонтьев В. Н., Черкез А. Я. и др.)	Полное воспроизведение повреждаемости от газовой коррозии: $h_{исп} = h_{экс}$; $\Phi_{исп} = \Phi_{экс}$	1. Сложное, трудоемкое и дорогое оборудование; 2. Большая длительность испытаний; 3. Высокие затраты на проведение испытаний
2. Автономные испытания лопаток на стендах (Букус И. А., Третьяченко Г. Н., Багерман А. З., Писаренко Г. С. и др.)	Результаты моделирования близки к эксплуатационным: $h_{исп} \approx h_{экс}$; $\Phi_{исп} \approx \Phi_{экс}$	1. Длительность испытаний до 150 ч; 2. Высокие затраты
3. В тиглях в расплавах солей NaCl + Na ₂ SO ₄ ; MgCl ₂ + KCl + NaCl; NaCl; H ₂ S (Орьшич И. В., Рябченков А. В., Дмитриева Г. П., Смыслов А. М., Быбин А. А., Шурин А. К., Назаров А. А. и др.)	1. Простота и экономичность испытаний, возможность получения кинетических и температурных зависимостей коррозионной стойкости сплавов ($\tau_{исп} \sim 5...60$ ч); 2. Низкая стоимость испытаний	1. Неполное воспроизведение эксплуатационных повреждений (при $h_{исп} = h_{экс}$ несоответствие фазового состава: $\Phi_{исп} \neq \Phi_{экс}$); 2. Несоответствие эксплуатационному механизму коррозии
4. С электрохимическим воздействием в расплавах солей: NaClO ₃ , NaNO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ (Иванов Г. Н., Румянцев Е. М., Амирханова Н. А., Седыкин Ф. В. и др.)	1. Малая длительность испытаний ($\tau_{экс} = 5...10$ мин); 2. Низкая стоимость испытаний; 3. Высокая производительность	1. Трудность обеспечения фазового состава коррозионного слоя: $\Phi_{исп} \neq \Phi_{экс}$; 2. Отсутствие термического нагружения
5. С предварительным нанесением на образцы золотых или нагарообразующих отложений: золы из смесей V ₂ O ₅ и Na ₂ SO ₄ (Липштейн Р. А., Бекетов Б. И., Никитин В. И. и др.)	1. Незначительная длительность ($\tau_{исп} \sim 5...60$ ч); 2. Небольшие затраты; 3. В испытаниях воспроизводится толщина коррозионного слоя ($h_{исп} = h_{экс}$)	1. Необходимость в периодическом обновлении агрессивной солевой пленки в связи с ее испарением; 2. $\Phi_{исп} \neq \Phi_{экс}$

Следует также отметить, что существующие методы автономных испытаний лопаток на надежность и ресурс при длительном статическом, повторно-статическом и других видах механического нагружения не воспроизводят полной картины коррозии, поскольку при этом не моделируется рабочая среда, и это естественно снижает достоверность оценки надежности и ресурса лопаток. Ускоренные испытания лопаток в системе двигателя, проводимые с форсированием режима нагружения по частоте вращения, температуре, вибрации и т.д., также не воспроизводят полной картины коррозии по причине малой длительности пребывания лопатки в газовой среде.

Необходимо отметить, что дополнительно к перечисленным методам 1...5 существуют другие методы ускоренных испытаний лопаток турбин. Так, например, в работах [1, 24, 26] рассмотрен метод ускоренных испытаний лопаток турбин.

6. МЕТОД УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ТУРБИН НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНУЮ ГАЗОВУЮ КОРРОЗИЮ

В данном случае в качестве показателей повреждаемости $\Pi_{кор}$ лопатки турбины рассматриваются следующие характеристики:

- толщина h или масса m поверхностного слоя лопатки

$$h_{кор} \vee m_{кор};$$

- состав поверхностного слоя лопатки

$$\bar{C}_{кор} = [c_1, \dots, c_i]^T = [Ni, Al, W, Cr, Ti, \dots]^T;$$

- микроструктура (фазовый состав) поверхностного слоя лопатки

$$\bar{\Phi}_{кор} = [\Phi_1, \dots, \Phi_i]^T,$$

где Φ_i – i -я фаза микроструктуры ($\alpha, \beta, \gamma, \dots$).

Таким образом,

$$\Pi_{кор} = [h_{кор}, \bar{C}_{кор}, \bar{\Phi}_{кор}]^T \vee \Pi_{кор} = [m_{кор}, \bar{C}_{кор}, \bar{\Phi}_{кор}]^T.$$

Сокращение длительности испытаний сопловых лопаток турбин обеспечивается путем последовательно реализуемых нагружений R_i :

- травление лопатки в электролите – $R_{тр}$;
- электрохимическая обработка (ЭХО) – $R_{эхo}$;
- высокотемпературная обработка в среде агрессивных газов – $R_{вто}$;

$$R_{исп} \sim R_{тр} \rightarrow R_{эхo} \rightarrow R_{вто}.$$

Эквивалентность ускоренных (смоделированных) и эксплуатационных испытаний при

высокотемпературной газовой коррозии обеспечивается получением поверхностного слоя сопловой лопатки, эквивалентного эксплуатационному по толщине коррозионного слоя, составу и микроструктуре поверхностного слоя:

$$\bar{\Pi}_{исп} = f(R_{тр}, R_{эхo}, R_{вто}) = \bar{\Pi}_{экс} = f(\tau_{экс}, \bar{R}_{экс}),$$

где $\bar{\Pi}_{исп}, \bar{\Pi}_{экс}$ – коррозионная повреждаемость лопатки в ускоренных испытаниях и эксплуатационных условиях; $\tau_{экс}, \bar{R}_{экс}$ – длительность и вектор параметров эксплуатационного нагружения.

На этапах травления и электрохимической обработки в ускоренных испытаниях формируется коррозионный слой, эквивалентный эксплуатационному по толщине и составу продуктов коррозии:

$$I: \begin{cases} h_{кор.исп}^{(1)} = f(R_{тр} \rightarrow R_{эхo}); h_{кор.исп} = h_{кор.экс}; \\ \bar{C}_{кор.исп} = \bar{C}_{кор.экс}; h_{кор.исп}^{(1)} = F(R_{тр}); \\ \bar{C}_{кор.исп}^{(1)} = F(R_{тр}); \bar{\Phi}_{кор.исп}^{(1)} = F(R_{тр}); \\ R_{тр} = f(\bar{\mathcal{E}}_{тр}, T_{тр}, \tau_{тр}); \bar{\mathcal{E}}_{тр} = [e_{тр.1}, \dots, e_{тр.l}]^T; \end{cases}$$

$$II: \begin{cases} h_{кор.исп}^{(2)} = F(R_{эхo}); \bar{C}_{кор.исп}^{(2)} = F(R_{эхo}); \\ \bar{\Phi}_{кор.исп}^{(2)} = F(R_{эхo}); \\ R_{эхo} = \bar{C}_{кор.исп}^{(2)} = f(\bar{\mathcal{E}}_{эхo}, J_{эхo}, T_{эхo}, \tau_{эхo}); \\ \bar{\mathcal{E}}_{эхo} = [e_{эхo.1}, \dots, e_{эхo.l}]^T, \end{cases}$$

где $h_{кор.исп}^{(1)}, h_{кор.исп}^{(2)}$ – толщина коррозионного слоя после травления и ЭХО соответственно; $\bar{\mathcal{E}}_{тр}, \bar{\mathcal{E}}_{эхo}$ – электролиты, включающие $e_{тр.1}, \dots, e_{тр.l}$ и $e_{эхo.1}, \dots, e_{эхo.l}$ компонент (соли для приготовления раствора электролита); $\bar{C}_{кор.исп}^{(1)}, \bar{C}_{кор.исп}^{(2)}$ – состав поверхностного слоя после травления и ЭХО; $J_{эхo}$ – ток ЭХО; $T_{тр}$ и $T_{эхo}$ – температура травления и ЭХО; $\tau_{тр}$ и $\tau_{эхo}$ – длительность травления и ЭХО.

На этапе высокотемпературной обработки формируется коррозионный слой, эквивалентный эксплуатационному по микроструктуре (фазовому составу).

Последовательность реализации рассматриваемого метода ускоренных испытаний сопловых лопаток ГТД на высокотемпературную газовую коррозию сводится к выполнению этапов, приведенных на рис. 2.

К ускоренным испытаниям готовят образцы новых лопаток, вырезанные с места, соответ-



Рис. 2. Общая схема проведения ускоренных испытаний сопловых лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию

вующего максимальной температуре, наблюдаемой в эксплуатации.

Уровень эквивалентности ускоренных испытаний эксплуатационным может быть повышен за счет варьирования параметрами отдельных составляющих рассмотренной последовательности ускоренных испытаний.

При этом сокращение длительности испытаний определяется по формуле:

$$K_Y = \frac{\tau_{\text{ЭКС}}}{\tau_{\text{МОД}}} = \frac{\tau_{\text{ЭКС}}}{\tau_{\text{ТР}} + \tau_{\text{ЭХО}} + \tau_{\text{ПЕЧ}}},$$

где $\tau_{\text{ЭКС}}$, $\tau_{\text{МОД}}$ – длительность эксплуатационных и модельных испытаний; $\tau_{\text{ТР}}$ – длительность травления; $\tau_{\text{ЭХО}}$ – длительность электрохимической обработки; $\tau_{\text{ПЕЧ}}$ – длительность термообработки в печи, включая длительность нагрева $\tau_{\text{НАГ}}$, выдержки $\tau_{\text{ВЫД}}$ и охлаждения $\tau_{\text{ОХЛ}}$.

При испытании образцов из сплава ЖСБК ($\tau_{\text{ТР}} = 0,08$ ч., $\tau_{\text{ЭХО}} = 1,0$ ч.; $\tau_{\text{НАГ}} = 1,0$ ч., $\tau_{\text{ВЫД}} = 5,0$ ч. и $\tau_{\text{ОХЛ}} = 2,5$ ч.) получено сокращение длительности испытаний в 146 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гишваров А. С.** Повреждаемость материалов энергетических установок в условиях коррозионно-активной среды. М.: Машиностроение, 2014. 297 с. [[A. S. Gishvarov, *Defectiveness materials power plants under corrosive environment*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2014.]]

2. **Павлов Ю. И., Шайн Ю. Я., Абрамов Б. И.** Проектирование испытательных стендов для авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 1979. 152 с. [[Y. I. Pavlov, Y. Y. Shain, B. I. Abramov, *Design of test benches for aircraft engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1979.]]

3. **Симс Ч., Хагель В.** Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия, 1976. 558 с. [[C. Sims, W. Hagel, *Superalloys*, (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1976.]]

4. **Черкез А. Я., Онищик И. И., Таран Е. М. и др.** Испытания воздушно-реактивных двигателей М.: Машиностроение, 1992. 304 с. [[A. Y. Cherkez, I. I. Onishik, E. M. Taran, *Testing jet engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1992]]

5. **Борьба с коррозией двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок:** учеб. пособие для вузов / Д. С. Абрамсон и др. М.: Машиностроение, 1962. 296 с. [[A. S. Abramson, *Corrosion control of internal combustion engines and gas turbines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1962.]]

6. **Исследование высокотемпературного окисления лопаток турбины ГТД в присутствии солей щелочных металлов / Е. Н. Карпов, И. И. Тарасевич, Н. Н. Мотрий и др. // Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей:** сб. науч. тр. Киев: КИИГА, 1979. С. 35–46. [[E. N. Karpov, I. I. Tarasevich, N. N. Motriy, "The high-temperature oxidation of the turbine blade GTE presence of alkali metal salts," in *Reliability and durability of aircraft gas turbine engines*, (in Russian), pp. 35-46, Kiev: KIIIGA, 1979.]]

7. **Тарасевич И. Н.** Высокотемпературное окисление лопаток турбин при теплосменах: авт. свид. № 1022014. МПК7 G01N 17/00. Опубл. 12.02.1983. Бюл. № 2. [[I. N. Tarasevich, *High-temperature oxidation of turbine blades during thermal cycles*, (in Russian), certificate no. 1022014, 1983.]]

8. **Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния / Г. Н. Третьяченко, Л. В. Кравчук, Р. И. Куриат и др. Киев: Наукова думка, 1985. Вып 3. 280 с. [[G. N. Tretyachenko, R. I. Kuriat, *Thermal fatigue of materials under thermal stress inhomogeneous state*, (in Russian). Kiev: Naukova dumka, 1985.]]**

9. **Разработка методики ускоренных коррозионных испытаний жаропрочного сплава ЦНК-7П / А. А. Быбин, Р. Р. Невьявцева, О. Г. Смольникова, А. М. Смыслов // VII Королёвские чтения:** сб. тр. Междунар. науч. техн. конф. Самара: СГАУ, 2003. С. 156–157. [[A. A. Bybin, R. R. Nevyavceva, O. G. Smolnikova, "Development of the method of accelerated corrosion tests superalloy TSNK-7P," (in Russian), in *Proc. VII Int. Workshop on Korolevskie chteniya*, Samara, Russia, pp. 167-157, 2003.]]

10. **Быбин А. А., Смыслов А. М., Невьявцева Р. Р.** Некоторые особенности высокотемпературного окисления

алюминидных покрытий на сплаве ЦНК7П // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 8. С. 31–36. [[А. А. Bybin, А. М. Smyslov, R. R. Nevyayceva, "Some features of the high-temperature oxidation of aluminide coatings on the alloy TSNK7P," (in Russian), in *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, no. 8, pp. 31-36, 2004.]]

11. **Иванов Е. Г., Коломыцев П. Т., Костина Л. А.** О катастрофическом окислении никелевых сплавов // *Защита металлов*. 1973. № 1. С. 8–13. [[Е. Г. Ivanov, P. T. Kolomycev, L. A. Kostina, "About catastrophic oxidation of nickel alloys," (in Russian), in *Zashita metallov*, no.1, pp. 8-13, 1973.]]

12. **Окисление жаростойких сталей и сплавов** / Л. Л. Мигаи, Н. П. Козлова, А. И. Ляпунов, Е. Г. Мальчевский, Б. И. Бекетов // *Защита металлов*. 1972. № 6. С. 34–46. [[L. L. Migay, N. P. Kozlova, A. I. Lyapunov, E. G. Malchevskiy, B. I. Beketov, "Oxidation of heat-resistant steels and alloys," (in Russian), in *Zashita metallov*, no.6, pp. 34-46, 1972.]]

13. **Орышич И. В.** Разработка методики испытания жаропрочных сплавов в расплавах солей // *Защита металлов*. 1981. № 1. С. 16–23. [[I. V. Orishich, "Development of methodology for testing high-temperature alloys in molten salts," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 1, pp. 16-23, 2014.]]

14. **Смыслов А. М., Невьянцева Р. Р., Быбин А. А.** Высокотемпературная коррозия сплава ЦНК7П с защитным алюминидным покрытием // *Защита металлов*. 2004. Т. 40, № 5. С. 533–536. [[А. М. Smyslov, R. R. Nevyayceva, A. A. Bybin, "High temperature corrosion TSNK7P alloy with a protective aluminide coating," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 5, pp. 533-536, 2014.]]

15. **Гребенщикова С. В., Кочергин В. П., Зарубин П. И.** Коррозия сталей в водном растворе сульфита натрия // *Защита металлов*. 1979. № 5. С. 8–12. [[S. V. Grebenshokova, V. P. Kochergin, P. I. Zarubin, "Corrosion of steel in an aqueous solution of sodium sulfite," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 5, pp. 8-12, 1979.]]

16. **Орышич И. В.** О кинетике и механизме высокотемпературной коррозии жаропрочных сплавов на никелевой основе // *Авиационная промышленность*. № 1. 1986. С. 57–59. [[I. V. Orishich, "Kinetics and mechanism of high-temperature corrosion of heat-resistant nickel-based alloys," (in Russian), in *Aviacionnaya promishlennost*, no. 1, pp. 57-59, 1986.]]

17. **Озерная И. Н.** Коррозия металлов в расплавленных солях при термической обработке // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1985. № 3. С. 14–17. [[I. N. Ozernaya, "Corrosion of metals in molten salt during heat treatment," (in Russian), in *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, no. 3, pp. 14-17, 1985.]]

18. **Сандлер Н. Г., Козин В. А., Новоселов С. А.** Устройство для испытания металлов на коррозию под напряжением: авт. свид. № 993014. МПК7 G 01N17/00. Опубл. 16.04.1981. Бюл. № 5. [[N. G. Sandler, V. A. Kozin, S. A. Novoselov, "Device for testing metal corrosion under stress," (in Russian), certificate no. 993014, 1981.]]

19. **О механизме сульфидной коррозии аустенитных хромоникелевых сталей в продуктах сгорания высокосернистых мазутов** / Б. И. Бекетов, А. В. Рябченков, А. И. Максимова, В. А. Батырев, П. З. Резникова // *Защита металлов*. 1977. № 1. С. 13–20. [[В. И. Beketov, A. V. Ryabchenkov, A. I. Maksimov, V. A. Batyrev, P. Z. Reznikova, "Mechanism of sulfide corrosion of austenitic chromium-nickel steels in sour

fuel oil combustion products," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 1, pp. 13-20, 1977.]]

20. **Жаростойкость** материалов лопаток газовых турбин / Л. Б. Гецов, В. И. Никитин, И. П. Комиссарова, А. А. Чикурова // *Энергомашиностроение*. 1978. № 2. С. 29–33. [[L. B. Getsov, V. I. Nikitin, I. P. Komissarova, A. A. Chikurova, "Heat resistance of materials of gas turbine blades," (in Russian), in *Energomashinostroenie* no. 2, pp. 29-33, 1978.]]

21. **Высокотемпературная** солевая коррозия никель-карбидных эвтектических сплавов / Г. П. Дмитриева, О. С. Костырко, И. И. Максютя, Н. А. Разумова, А. К. Шурин // *Защита металлов*. 1987. № 2. С. 20–25. [[G. P. Dmitrieva, O. S. Kostyrko, I. I. Maksyuta N. A. Razumova, A. K. Shurin, "High-salt corrosion of nickel-carbide eutectic alloys" (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 2, pp. 20-25, 1987.]]

22. **Рябченков А. В., Кузнецов Е. В., Мясникова Ф. В.** Высокотемпературная коррозия сплавов на основе никеля // *Защита металлов*. 1986. № 5. С. 37–44. [[А. В. Ryabchenkov, E. V. Kuznetsov, F. V. Myasnikova, "High temperature corrosion of nickel-based alloys," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 5, pp. 37-44, 1986.]]

23. **Высокотемпературная** солевая коррозия легированных никель-карбидных эвтектических сплавов / А. К. Шурин, Г. П. Дмитриева, И. И. Максютя, Н. А. Разумова // *Защита металлов*. 1989. № 6. С. 53–75. [[А. К. Shurin, G. P. Dmitrieva, I. I. Myaksyutam N. A. Razumova, "High-salt corrosion alloyed nickel-carbide eutectic alloys," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 6, pp. 53-75, 1989.]]

24. **Гишваров А. С.** Теория ускоренных ресурсных испытаний технических систем. Уфа: Гилем, 2000. 338 с. [[А. S. Gishvarov, *The theory of accelerated life tests of technical systems*, (in Russian). Ufa: Gilem, 2000.]]

25. **Машины** и приборы для испытания материалов: сб. статей. М.: Металлургия, 1971. 299 с. [[*Machines and appliances for testing materials*, (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1971.]]

26. **Гишваров А. С., Амирханова Н. А., Амиров Р. А., Янбердина З. Я.** Моделирование высокотемпературной газовой коррозии элементов узлов ГТД // *Автоматизация разработки авиационных двигателей*: сб. науч. тр. Уфа: УГАТУ, 1989. С. 149–151. [[А. S. Gishvarov, N. A. Amirhanova, R. A. Amirov, Z. Y. Yanberdina, "Simulation of high-temperature gas corrosion element nodes GTE," (in Russian), in *Proc. Workshop on Avtomatizaciya razrabotki aviacionnih dvigateley*, Ufa, Russia, pp. 149-151, 1989.]]

27. **Орышич И. В.** Способ испытания жаропрочных сплавов на стойкость к высокотемпературной солевой коррозии: авт. свид. № 1772694. МПК7 G01N17/00. Опубл. 23.12.1992. Бюл. № 12. [[I. V. Orishich, "Test method superalloys high resistance to salt corrosion," (in Russian), certificate no. 1772694, 1992.]]

28. **Орышич И. В., Порядченко Н. Е., Ракицкий А. Н.** Расширение температурного диапазона при испытаниях жаропрочных и жаростойких материалов на сопротивление сульфидной коррозии // *Защита металлов*. 1994. № 5. С. 22–28. [[I. V. Orishich, N. E. Poryadchenko, A. N. Rakitskiy, "Extended temperature range when testing heat-resistant materials for corrosion resistance to sulfide," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 5, pp. 22-28, 1994.]]

29. **Орышич И. В., Ракицкий А. Н.** Расширение температурного диапазона испытаний жаропрочных сплавов на сопротивление высокотемпературной хлоридной коррозии // *Защита металлов*. 1995. № 3. С. 24–39. [[I. V. Orishich, A. N. Rakitskiy, "Extended temperature range tests sup-

eralloys high-chloride-induced corrosion resistance," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 3, pp. 24-39, 1995.]]

30. **Орышич И. В.** Коррозия сплавов на никелевой основе в расплавах тройной эвтектики из хлоридов MgCl₂, KCl, NaCl // *Защита металлов*. 1997. № 4. С. 23–35. [[I. V. Orishich, "Corrosion of nickel-based alloys in molten ternary eutectic of chloride MgCl₂, KCl, NaCl" (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 4, pp. 23-35, 1997.]]

31. **Орышич И. В.** Повышение сопротивления сульфидной коррозии никелевых жаропрочных сплавов путем легирования // *Защита металлов*. 1999. № 6. С. 22–30. [[I. V. Orishich, "Increases resistance to sulfide corrosion of nickel superalloys by alloying," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 6, pp. 22-30, 1999.]]

32. **О коррозионной агрессивности растворов слабых кислот и их солей** / В. С. Белевский, Ю. И. Куделин, С. Ф. Лисов, В. А. Тимонин // *Защита металлов*. 1990. № 5. С. 45–51. [[V. S. Belevskiy, Y. I. Kudelkin, S. F. Lisov, V. A. Timohin, "Corrosiveness of solutions of weak acids and salts thereof," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 5, pp. 45-51, 1990.]]

33. **Воликова И. Г.** Ускоренный метод определения стойкости коррозионностойких сталей в кислых и нейтральных средах // *Защита металлов*. 1971. № 4. С. 21–25. [[I. G. Volikova, "Rapid method for determining the resistance of stainless steels in acidic and neutral media" (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 4, pp. 21-25, 1971.]]

34. **Седыкин Ф. В.** Технология и экономика электрохимической обработки М.: Машиностроение, 1980. 192 с. [[F. V. Sedykin, *Technology and economics electrochemical machining*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1980.]]

35. **Акользин П. А., Апхазова М. В., Ирмевив Т. В.** Метод коррозионного испытания металлов по истечению в жидких и коррозионных средах // *Защита металлов*. 1972. № 2. С. 15–20. [[P. A. Akolzin, M. V. Aphazava, T. V. Irmeviv, "The method of corrosion testing of metals on the expiration of a liquid and corrosive environments" (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 2, pp. 15-20, 1972.]]

36. **Стенд** для коррозионно-электрохимических исследований в потоке морской воды / А. Н. Лебедев, Б. И. Курсанова, Е. В. Константинова, А. С. Дербышев и др. // *Защита металлов*. 1981. № 4. С. 45–56. [[A. N. Lebedev, B. I. Kursanova, E. V. Konstantinova, A. S. Derbishev, "Stand for corrosion-electrochemical investigations is-in the flow of sea water," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 4, pp. 45-56, 1981.]]

37. **Никитин В. И.** Коррозия и защита лопаток газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1987. 272 с. [[V. I. Nikitin, *Corrosion and protection of gas turbine blades*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1987.]]

38. **Чижик А. А., Ланин А. А., Ермаков Б. С.** Распространение коррозионных трещин в дисках паровых турбин // *Энергомашиностроение*. 1988. № 11. С. 32–34. [[A. A. Chizjik, "Increase corrosion cracks in disks of steam turbines," (in Russian), in *Energomashinostroenie*, no. 11, pp. 32-34, 1988.]]

39. **Новикова А. Ф., Фесенко Л. Н., Теньковцев В. В. и др.** Способ определения коррозионной стойкости металлокерамических никелевых образцов: авт. свид. № 1377684. МПК7 G01N17/00. Оpubл. 23.06.1988. Бюл. № 6. [[A. F. Novikova, L. N. Fesenko, V. V. Tenkovtsev, *A method for determining the corrosion resistance of nickel-metallokeramicheskikh samples*, (in Russian), certificate no. 1377684, 1988.]]

40. **Мирошниченко О. А., Шаповалов А. Л., Крутовая-Козинец А. А.** Способ определения скорости коррозии углеродистой стали: авт. свид. № 1290147. МПК7 G01N17/00. Оpubл. 12.03.1987. Бюл. № 5. [[O. A. Miroshnichenko, A. L. Shapovalov, A. A. Krutovaya-Kozinets, *A method for determining the corrosion rate of carbon steel*, (in Russian), certificate no. 1290147, 1987.]]

41. **Богоявленская Н. В., Третьякова В. Д.** Поведение углеродистой стали при электрополировке в электролите с добавками ПАВ // *Защита металлов*. 1972. № 2. С. 87–93. [[N. V. Bogoyavlenskaya, V. D. Tretyakova, "Behavior of Carbon Steel at electropolishing in an electrolyte with the additives of surfactants," (in Russian), in *Zashita metallov*, no. 2, pp. 87-93, 1972.]]

ОБ АВТОРАХ

ГИШВАРОВ Анас Саидович, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УГАТУ, 1993). Теор. и эксп. иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний технических систем.

ДАВЫДОВ Марсель Николаевич, доц. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по тепл. и э/ракетн. двигателям ЛА (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. испытаний технических систем.

METADATA

Title: Test methods of turbine blades at high temperature gas corrosion.

Authors: A. S. Gishvarov¹, M. N. Davydov².

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ^{1,2}ad@mail.rb.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 1 (67), pp. 45-54, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The features of the existing test methods turbine blades on the high-temperature gas corrosion. A comparative analysis of their effectiveness.

Key words: defectiveness; turbine blade; high-temperature corrosion test methods; materials GTE.

About authors:

GISHVAROV, Anas Saidovich, Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer (USATU, 1973). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 1993).

DAVYDOV, Marsel Nikolaevich, Dipl. engineer of aircraft engines. (USATU, 2002), Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2006).