

УДК 621.165.620

15
А. М. СМЫСЛОВ, А. А. БЫБИН, Р. Р. НЕВЬЯНЦЕВА**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТВД
ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СОСТАВЕ ИЗДЕЛИЯ ГТК-25И
И ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА**

Приводятся результаты исследования состояния рабочей лопатки ТВД после эксплуатации в течение 56 тыс. ч в составе изделия ГТК-25И. Рассмотрено состояние защитных покрытий на наружном и внутреннем профиле пера лопатки. Выполнен сравнительный анализ точкой структуры никелевого сплава в перовой и хвостовой части лопатки. Установлено, что в наружном покрытии имеются коррозионные повреждения до 1/2 его глубины, а в сплаве в перовой зоне в процессе наработки произошли структурные изменения, ограничивающие дальнейшую работоспособность деталей. Предложены мероприятия по восстановительному ремонту лопаток ТВД. *Рабочая лопатка ТВД; длительная эксплуатация; никелевый сплав; защитное покрытие; коррозионное повреждение; структурные изменения; восстановительный ремонт*

ВВЕДЕНИЕ

Бесперебойная эксплуатация газовых турбин, используемых в качестве привода на газоперекачивающих агрегатах, во многом определяется работоспособностью роторных лопаток турбины высокого давления. В процессе эксплуатации в течение длительного времени лопатки испытывают действие растягивающих, изгибных и динамических вибрационных нагрузок, высоких температур и агрессивных компонентов воздушно-топливной смеси. В таких условиях в лопатках как в материале сплава, так и в защитном покрытии на трактовой поверхности неизбежно происходят структурно-фазовые изменения, приводящие к потере работоспособности деталей. Опыт эксплуатации и ремонта газовых турбин показывает, что при наработке равной назначенному ресурсу деталей материал сплава и покрытия лопаток ТВД достигает наиболее критического состояния. Согласно данным исследования [1] возможность эксплуатации лопаток сверх ресурса на этапе регламентных работ в первую очередь должна определяться как состоянием защитного покрытия (остаточная толщина слоя, химический состав, наличие коррозионных и механических повреждений), так и состоянием основного металла (прочностные и пластические характеристики).

Целью исследования является анализ состояния рабочих лопаток ТВД, которые эксплуатировались в течение 56 тыс. ч в соста-

ве газотурбинной установки типа ГТК-25И, и разработка рекомендаций по восстановительному ремонту деталей для продления их ресурса.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования состояния защитного покрытия и основного металла лопаток были отобраны две лопатки от комплекта, которые разрезались по специально разработанной схеме.

Определение химического состава и исследование структуры сплава и покрытия проводили на электронном микроскопе JXA-6400, JEOL с использованием энергодисперсионного анализатора Microtrace Series II (NORAN). Твердость материала сплава лопатки испытывали по Бринеллю стальным шариком диаметром 10 мм при нагрузке 3000 кгс. Измерение микротвердости покрытия проводили на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор 50 г. На стандартных образцах проводили испытания сплава на одноосное растяжение при температуре 20 и 650°C и длительную прочность при $t = 900^\circ\text{C}$ и $\sigma = 206$ МПа.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемые лопатки изготовлены иностранной фирмой «General Electric» и поставлялись для эксплуатации в ОАО «Газпром» в комплекте с газовой турбиной ГТК-25И.

Однако сведения о технологии изготовления лопаток и о применяемых материалах поставщик для эксплуатирующей организации не предоставляет. В условиях отсутствия данной информации с целью продления срока службы деталей ставилась задача комплексного исследования лопаток, включая проработку возможных технологий получения заготовки лопатки и защитного покрытия.

Общий вид лопатки ТВД в постэксплуатационном состоянии приведен на рис. 1.

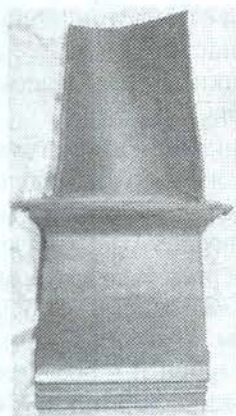


Рис. 1. Внешний вид рабочей лопатки ТВД с наработкой 56 тыс. ч

В качестве конструктивных особенностей лопатки следует отметить наличие массивного хвостовика, который обычно разделяется на ножку и замок «елочного» типа в нижней части. Перовая часть лопатки характеризуется наличием наружного и внутреннего профиля. Внутренний профиль конструктивно предназначен только для облегчения веса лопатки и не выполняет функции охлаждения детали.

Комплект лопаток ТВД был осмотрен визуально с использованием лупы четырехкратного увеличения и подвергнут капиллярному люминесцентному контролю. Установлено, что на 75% лопаток от комплекта на тракторной поверхности в основном в концевой части пера имеются множественные забоины глубиной до 3 мм. В тоже время по данным контроля ЛЮМ1-ОВ каких-либо трещин, включая места забоин, выявлено не было. Отмечается, что на всех лопатках со стороны корыта преимущественно в концевой и средней части имеется прогар защитного покрытия (рис. 1). Люминесцентный контроль в данных местах показал наличие свечения люминофора в виде «звездного неба». Цвет области прогара и характер свечения люминофора свидетельствуют об образовании в данной зоне лопатки рыхлого оксидного слоя. В

работе [2] указывается, что такой слой содержит, как правило, оксиды легирующих элементов сплава.

На образцах, вырезанных из хвостовой и перовой части лопатки, проведен микроанализ химического состава исследуемых деталей. Результаты химического анализа материала сплава лопатки представлены в табл. 1. Согласно данным работы [3] комплект рабочих лопаток ТВД изделия ГТК-25И изготавливается фирмой «General Electric» из никелевого сплава IN738LC. Однако в технических условиях на эксплуатацию изделия на территории РФ оговорено, что в процессе ремонтных работ может быть произведена замена комплекта лопаток на лопатки ТВД из отечественного сплава ЗМИ-ЗУ. С целью установления точной марки материала сплава исследуемой лопатки анализ проводился по элементам, входящим в состав обоих указанных сплавов.

Таблица 1

Химический состав материала сплава рабочей лопатки ТВД (средние значения, масс. %)

Элемент	Проба	Сплав IN738LC [2]	Сплав ЗМИ-ЗУ [1]
Ni	62,0	основа	основа
C	0,1	0,09 ... 0,13	0,07 ... 0,15
Cr	16,3	15,7 ... 16,3	12,5 ... 14,0
Co	8,4	8,0 ... 9,0	4,0 ... 6,0
Ti	3,7	3,2 ... 3,7	2,8 ... 4,0
Al	3,65	3,2 ... 3,7	2,8 ... 4,0
Mo	1,8	1,5 ... 3,5	0,5 ... 1,25
W	2,7	2,4 ... 2,8	6,5 ... 8,0
Ta	2,0	1,5 ... 2,0	У 0,03 (по расчету)
Nb	0,8	0,6 ... 1,1	La 0,01 (по расчету)
Zr	0,03	0,03 ... 0,08	—
B	0,0078	0,007 ... 0,012	0,015 (по расчету)
Fe	0,22	≤ 0,5	≤ 1,5
Si	0,3	≤ 0,3	≤ 0,4
Mn	0,13	≤ 0,2	≤ 0,3

Сопоставление полученных результатов микроанализа с литературными данными позволяет идентифицировать материал лопатки как сплав IN738LC. Кроме того, данная информация позволяет утверждать, что при проведении регламентных работ не проводилась замена деталей на комплект лопаток из отечественного сплава ЗМИ-ЗУ.

Металлографические исследования макроконтроля, вырезанных в продольном и по-

перечном направлении относительно оси пера лопатки, показали, что макроструктура сплава крупнозернистая с равноосной кристаллизацией. Такая структура сплава с учетом конструктивных особенностей лопатки ТВД свидетельствует о получении заготовки литьем по выплавляемым моделям без припуска по трактовым поверхностям. Изучением макроструктуры сплава под бинокляром при увеличении до десяти раз установлено, что в дефекты как литейного происхождения, так и образовавшиеся в процессе эксплуатации (поры, трещины) в металле отсутствуют.

Микроструктура сплава исследовалась на образцах, вырезанных из входной кромки концевой части пера, являющейся наиболее нагретой в процессе эксплуатации. Для сравнения также оценивалась микроструктура сплава в хвостовой части. Согласно данным работы [1] микроструктура хвостовика вследствие низкой рабочей температуры совпадает с исходным состоянием металла до эксплуатации. Результаты металлографического анализа микроструктуры сплава в рассматриваемых зонах представлены на рис. 2.

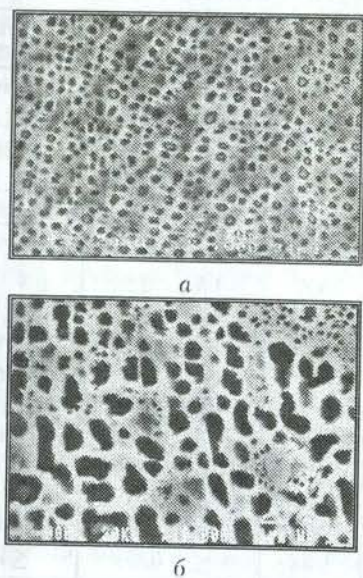


Рис. 2. Микроструктура сплава хвостовика (а) и пера (б) лопатки ТВД ГТК-25И после наработки 56 тыс. ч

Установлено, что сплав как в перовой, так и в хвостовой части лопатки характеризуется достаточно высокой плотностью металла. Небольшое количество незначительных по размеру микропор обнаружено только в ножке хвостовой части.

Исследования материала сплава хвостовика после травления показали, что микроструктура лопатки представляет собой ма-

трицу с ГЦК решеткой, содержащую когерентную интерметаллидную γ/\prime -фазу, эвтектику $\gamma + \gamma/\prime$ и карбиды $M_{23}C_6$ и MC равноосной морфологии (рис. 2, а). Объемная доля выделений γ/\prime -фазы, оцененная методом точечного анализа, в хвостовой части составляет 44... 45%, что соответствует данным для исходного состояния металла после термической обработки исследуемого сплава и согласуется с данными работы [4]. Упрочняющая γ/\prime -фаза характеризуется кубической морфологией со средним размером частиц $\sim 0,7$ мкм. В соответствии с представлениями ВИАМ [5] такой размер частиц γ/\prime -фазы является оптимальным с точки зрения высокотемпературной ползучести.

В процессе наработки в структуре металла перовой части лопатки, в отличие от хвостовика произошли довыделение мелкодисперсной γ/\prime -фазы и незначительная коагуляция частиц γ/\prime -фазы (рис. 2, б). Кроме того, установлено дополнительное выделение карбида $M_{23}C_6$, частицы которого более полно заполнили границы зерен и в большем количестве выделились вокруг карбидов MC , первичной γ/\prime -фазы и эвтектики. Оценка объемной доли γ/\prime -фазы в сплаве перовой части лопатки показала, что ее количество достигает 47... 48%. Возрастание количества γ/\prime -фазы в процессе эксплуатации отмечалось также авторами работы [1] при исследовании состояния сплава ЗМИ-3У с наработкой 22 тыс. ч.

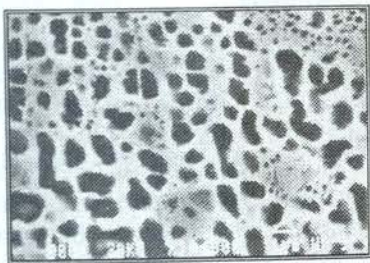
Установлено, что на наружном и внутреннем профиле пера лопатки имеется защитное покрытие. Однако, как отмечалось выше, на наружном профиле со стороны корыта в концевой и средней части пера покрытие отсутствует и наблюдается интенсивное окисление никелевого сплава. На внутреннем профиле по всей высоте пера защитное покрытие сохранилось полностью. Общий вид микроструктуры защитного покрытия на наружном и внутреннем профиле приведен на рис. 3. Результаты измерения толщины исследуемых покрытий и микротвердости в характерных зонах приведены в табл. 2.

Как видно из данных, приведенных на рис. 3 и в табл. 2, толщина защитных покрытий на разных профилях практически одинакова и в среднем составляет 90 мкм. Анализ микроструктуры покрытий показывает, что можно выделить две характерные зоны: внешнюю и внутреннюю, средние толщины которых составляют 65 и 25 мкм соответственно.

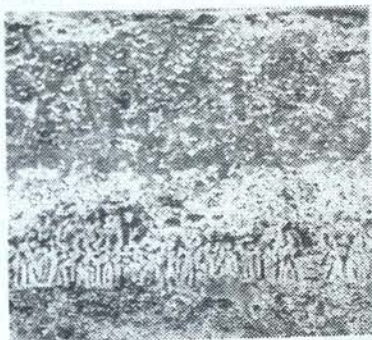
Таблица 2

Толщина и микротвердость покрытия на наружном и внутреннем профиле пера лопатки ТВД

Характеристика		Покрытие	
		на наружном профиле	на внутреннем профиле
Толщина, мкм	общая	85 ... 95	88 ... 97
	внешней зоны	60 ... 70	63 ... 69
	внутренней зоны	~ 25	25 ... 28
Микротвердость, МПа	внешней зоны	3500 ... 4100	4600 ... 8200
	внутренней зоны	8800 ... 9100	9000 ... 9250
	зоны сплава под покрытием	9900	10000
	сплава	5800 ... 6300	5800 ... 6300



а



б

Рис. 3. Микроструктура защитного покрытия на наружном (а) и внутреннем (б) профиле пера лопатки

Внешняя зона покрытия на наружном профиле практически на всю толщину имеет коррозионные повреждения. Слой, подверженный коррозии, характеризуется значительной пористостью, которая убывает по направлению к внутренней зоне покрытия. Покрытие

внутреннего профиля в отличие от наружного не было подвержено воздействию высокотемпературного агрессивного газового потока. На поверхности имеется только оксидная пленка, характеризующаяся незначительной пористостью. Кроме того, как видно из фотографий микроструктуры, «маркер» первоначальной поверхности сплава в покрытии внутреннего профиля остается без изменений, а в покрытии на наружном профиле «размывается», что связано с активными диффузионными процессами при воздействии высокой температуры и коррозионной газовой среды.

Во внутренней зоне исследуемых покрытий в верхней части наблюдаются фазы, различно ориентированные относительно поверхности сплава и покрытия, а в нижней части — фазы, вытянутые по глубине зоны покрытия и практически перпендикулярные сплаву.

Характерным признаком покрытий является наличие в сплаве зоны, располагающейся непосредственно под покрытием, толщина которой на наружном и внутреннем профиле составляет 10 ... 13 и 12 ... 17 мкм соответственно.

Для установления типа защитного покрытия на наружном и внутреннем профиле пера лопатки ТВД, возможных способов его получения и замены коррозионно-поврежденного покрытия на наружном профиле пера проведен микрорентгеноспектральный анализ в характерных зонах покрытия и в сплаве под покрытием. Результаты представлены в табл. 3.

Примечание: в числителе дан состав покрытия на наружном профиле, в знаменателе — на внутреннем профиле пера лопатки

При анализе полученных результатов следует иметь в виду, что за длительное время эксплуатации за счет проявления процессов высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии в покрытии могут произойти изменения как по химическому, так и по фазовому составу особенно во внешней зоне покрытия наружного профиля. Действительно, установлено пониженное содержание никеля, хрома и алюминия. Данный факт может быть обусловлен уносом продуктов коррозии под действием высокотемпературного газового потока.

Внутренняя зона менее подвержена коррозионному воздействию и содержание элементов в основном отвечает классическому составу внутренней диффузионной зоны. Так, сопоставление количества никеля и алюминия позволяет утверждать, что матрицей дан-

ной зоны являются фазы β -NiAl и γ -Ni₃Al. Содержание хрома, молибдена и вольфрама свидетельствует об армировании матрицы карбидами и силицидами. Несколько меньшее содержание этих элементов в верхней части внутренней зоны обусловлено ускоренной диффузией элементов во внешнюю зону за счет коррозионных процессов в поверхностном слое покрытия.

Таблица 3

Результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытия на наружном и внутреннем профиле пера лопатки ТВД

Элемент, масс. %	Внешняя зона		Внутренняя зона		Зона под покрытием
	верхняя часть	нижняя часть	верхняя часть	нижняя часть	
Ni	$\frac{29 \dots 47}{27 \dots 59}$	$\frac{49}{56}$	$\frac{58}{59}$	$\frac{55}{62}$	$\frac{21}{43}$
Cr	$\frac{1,3 \dots 4,7}{3,3 \dots 16,2}$	$\frac{4,7}{18,5}$	$\frac{4,4}{8,6}$	$\frac{12,0}{14,0}$	$\frac{38}{32}$
Ti	$\frac{0,3 \dots 0,5}{1,0 \dots 3,3}$	$\frac{0,6}{1,4}$	$\frac{1,2}{2,6}$	$\frac{3,1}{6,4}$	$\frac{8,8}{4,0}$
Al	$\frac{21 \dots 37}{22 \dots 40}$	$\frac{22}{16}$	$\frac{24}{20}$	$\frac{18}{11}$	$\frac{4,0}{4,0}$
Zr	$\frac{18 \dots 32}{0}$	$\frac{4,4}{0}$	$\frac{4,2}{0}$	$\frac{0,7}{0}$	$\frac{0}{0}$
Co	$\frac{4,0 \dots 5,0}{3,3 \dots 7,5}$	$\frac{5,5}{6,4}$	$\frac{6,8}{8,4}$	$\frac{6,7}{7,4}$	$\frac{8,0}{7,3}$
Mo	$\frac{0,7 \dots 1,8}{0,7 \dots 1,3}$	$\frac{0,3}{1,7}$	$\frac{0,1}{0,3}$	$\frac{0,8}{0,7}$	$\frac{5,0}{4,5}$
Nb	$\frac{2,4}{0,4}$	$\frac{1,7}{0,2}$	$\frac{0,6}{0,1}$	$\frac{0,6}{0,1}$	$\frac{1,7}{0,9}$
W	$\frac{1,8}{0,9}$	$\frac{0,5}{3,6}$	$\frac{0,2}{0,3}$	$\frac{1,6}{1,2}$	$\frac{5,0}{4,6}$
Si	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,6}{0,8}$	$\frac{1,3}{1,1}$

Зона сплава, расположенная непосредственно под внутренней зоной покрытия, характеризуется относительно низким содержанием никеля и повышенным хрома, титана, молибдена и вольфрама по сравнению с химическим составом никелевого сплава IN738LC. Авторы работы [6] утверждают, что данная закономерность обусловлена тем, что при расходовании никеля на образование упрочняющей γ -фазы матрица в защищаемом сплаве (γ -твердый раствор) обогащается легирующими элементами замещения. Кроме того, в работе отмечается, что такая закономерность свойственна и для композиционных покрытий системы Ni-Co-Cr-Al-ZrO₂, получаемых методом электронно-лучевого испарения. В

пользу такого типа покрытия свидетельствует и обнаруженное при микрорентгеноспектральном анализе (табл. 3) значительное содержание циркония в верхней части внешней зоны и его убывание по глубине покрытия до нулевого значения на границе со сплавом. Установленное распределение циркония в покрытии наружного профиля связано с градиентом введения оксидной фазы в начальной стадии процесса осаждения и с однородным распределением ZrO₂ во внешнем слое покрытия.

Анализ содержания элементов в покрытии внутреннего профиля позволил установить следующие закономерности:

- количественное содержание никеля и алюминия соответствует образованию фазы β -NiAl во внешней зоне и фазы γ -Ni₃Al во внутренней зоне покрытия;
- высокое содержание хрома во внешней зоне отвечает наличию его в виде частиц α -Cr;
- повышенное содержание легирующих элементов сплава во внутренней зоне покрытия, особенно в нижней его части, характерно для карбидных фаз, формирующихся во всех алюминидных покрытиях в процессе диффузионного отжига;
- содержание элементов в зоне сплава под покрытием внутреннего профиля аналогично их содержанию в данной зоне сплава на наружном профиле пера лопатки.

Исходя из распределения элементов в покрытии внутреннего профиля лопатки, следует предполагать, что данное покрытие представляет собой разновидность покрытия системы Cr-Al, полученного, как отмечается в работе [7], по малоактивному механизму. Так как такое покрытие создается на внутреннем профиле лопатки, то оно может быть нанесено одним из двух методов: порошковым или газациркуляционным. Несмотря на диффузионные процессы во время наработки, содержание основных элементов остается на уровне, обеспечивающем запас работоспособности данного покрытия.

С особенностями распределения элементов и структурно-фазового состава покрытия на наружном и внутреннем профиле пера лопатки ТВД согласуются и измерения микротвердости в характерных зонах покрытия и сплава (табл. 2). Основные различия по микротвердости наблюдаются только во внешней зоне исследуемых покрытий. За счет повреждения покрытия наружного профиля сульфидно-оксидной коррозией внешняя зона характеризуется относительно низкими

значениями микротвердости по сравнению с микротвердостью покрытия внутреннего профиля. Отсутствие значительных коррозионных повреждений и повышенное содержание хрома во внешней зоне покрытия внутреннего профиля определяет сохранение микротвердости на уровне, отвечающем состоянию покрытия до парботки.

Для определения уровня механических свойств материала лопатки с длительной наработкой проводились испытания образцов, вырезанных из лопатки. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

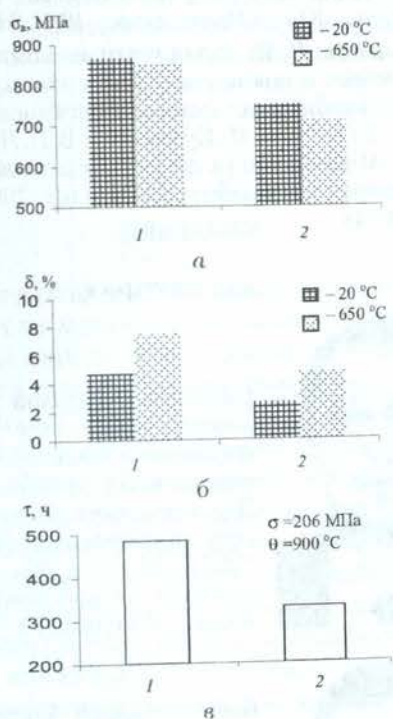


Рис. 4. Диаграммы изменения предела прочности (а), относительного удлинения (б) и времени до разрушения при испытании на длительную прочность (в) образцов, вырезанных из лопатки ТВД с парботкой 56 тыс. ч: 1 — образцы из зоны хвостовика; 2 — образцы из перовой части

Как следует из рисунка, механические свойства сплава в перовой части значительно отличаются от свойств сплава из зоны хвостовика. В процессе эксплуатации произошло снижение предела прочности и относительно удлинения в 1,2 и 1,8 раза соответственно. Кроме того, структурные изменения, наблюдаемые в перовой части лопатки, приводят к закономерному снижению времени до разрушения почти в 1,5 раза. Результаты испытаний твердости металла в различных зонах лопатки также указывают на падение уровня механических свойств сплава. Так, в перовой части твердость материала составляет 228 НВ, а в замковой части — 302 НВ.

Проведенное комплексное исследование состояния лопатки ТВД ГТК-25И с наработкой 56 тыс. ч. позволяет предложить следующие мероприятия по восстановлению работоспособности деталей:

- защитное покрытие на паружном профиле пера лопатки в виду сильного коррозионного повреждения требует разработки технологии эффективного его удаления при одновременном обеспечении отсутствия растравливания основы сплава;

- покрытие внутреннего профиля, сохранившее свою защитную способность, не требует восстановительного ремонта. Тем не менее, при реализации технологии удаления покрытия с наружного профиля, необходимо обеспечить изоляцию покрытия на внутреннем профиле пера, чтобы не допустить его подравливания;

- структурные изменения, наблюдаемые в сплаве в концевой и средней части пера лопатки, выдвигают проблему проведения ремонта, направленного на восстановление исходной структуры сплава при одновременном снижении уровня зернограничной микропористости. Для решения данной проблемы необходимо рассмотреть целесообразность применения технологии вакуумной термической обработки при температуре, близкой к температуре растворения упрочняющей γ -фазы исследуемого никелевого сплава, а также оценить технико-экономические возможности осуществления горячего изостатического прессования лопаток в инертной среде при температуре, близкой к температуре гомогенизации никелевого сплава, и давлении инертной среды, превышающем предел текучести сплава при сжатии;

- необходимость нанесения нового защитного покрытия на наружный профиль пера лопатки ставит задачу создания соответствующей технологии с учетом имеющегося в регионе технологического оборудования. При отработке технологии нанесения нового покрытия, необходимо учитывать возможность совмещения диффузионного отжига с режимами термовакуумной обработки лопаток;

- наличие забоин на поверхности концевой части пера лопатки требует дифференцированного подхода к их устранению. Значимым является этап установления допустимого уровня занижения толщины стенки лопатки, и устранения забоин путем механической выборки с обеспечением плавного перехода к основному металлу;

• комплекс мероприятий по восстановительному ремонту лопаток ТВД должен обеспечивать ресурс деталей не менее половины назначенного межремонтного ресурса.

ВЫВОДЫ

1. Рабочие лопатки ТВД из никелевого сплава IN738LC после наработки на изделии ГТК-25И в течение 56 тыс. ч. имеют эксплуатационные повреждения, ограничивающие их дальнейшую работоспособность.

2. Наличие коррозионных повреждений в наружном композиционном покрытии системы Ni-Co-Cr-Al-ZrO₂, распространяющихся по всей глубине внешней зоны, выдвигает необходимость его удаления при ремонте.

3. Диффузионное покрытие системы Cr-Al на внутреннем профиле характеризуется достаточным запасом алюминия, что обеспечивает сохранение защитных свойств.

4. В структуре сплава в первой части лопатки ТВД после длительной наработки установлено наличие коагуляции упрочняющей γ' -фазы, довыделение мелкодисперсной γ' -фазы и возрастание объемного количества упрочняющей γ' -фазы на 10%.

5. В процессе эксплуатации произошло снижение прочности, пластичности и долговечности материала пера лопатки в 1,2, 1,8 и 1,5 раза соответственно по сравнению с материалом хвостовой части.

6. Разработаны принципы формирования технологии ремонта лопаток ТВД, включающей мероприятия по удалению дефектного покрытия, устранению забоин на наружном профиле пера лопатки, восстановлению структуры сплава, снижению внутренней микропористости в сплаве, нанесению нового защитного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыбников, А. И.** Ресурс рабочих лопаток ТВД ГТК-25И из сплава ЗМИ-3У / А. И. Рыбников, И. И. Крюков, Н. В. Можайская, Н. В. Дашунин // Теплоэнергетика. 2003. № 2. С. 68–72.
2. **Никитин, В. И.** Коррозия и защита лопаток газовых турбин / В. И. Никитин. Л.: Машиностроение, 1987. 272 с.
3. **Дашунин, Н. В.** Опыт длительной эксплуатации стационарных ГТУ на магистральных газопроводах. Анализ характерных повреждений деталей / Н. В. Дашунин, А. И. Рыбников,

Л. Б. Гецов [и др.] // Вестник двигателестроения. 2006. № 3. С. 50–55.

4. **Ющенко, К. А.** Влияние термообработки и степени легирования на структурные изменения никелевых сплавов / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. В. Звягинцева // Автоматическая сварка. 2004. № 7. С. 14–16.
5. **Монастырская, Е. В.** Структура, фазовый состав и свойства коррозионно-стойкого жаропрочного сплава ЧС88У / Е. В. Монастырская, Г. И. Морозова, Ю. Б. Власов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 8. С. 39–44.
6. **Мовчан, Б. А.** Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме / Б. А. Мовчан, И. С. Машенко. Киев: Паук. думка, 1983. 232 с.
7. **Кузнецов, В. П.** Градиентные комплексные защитные покрытия для монокристаллических турбинных лопаток теплонапряженных ГТД / В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, С. А. Мубояджян [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 5. С. 41–48.

ОБ АВТОРАХ



Смыслов Анатолий Михайлович, зав. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей ЛА (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.



Быбин Андрей Александрович, доц. той же каф. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двиг. и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. технол. восст. ремонта деталей ГТД и ГПА.



Невьянцева Римма Рахимзяновна, доц. каф. общ. химии. Дипл. инж.-металлург и физ.-химик (Челябинск. политехн. ин-т, 1965). Канд. хим. наук по неорг. химии (защ. в ИФП СО АН СССР, 1972). Иссл. в обл. ремонта лопаток авиац. двиг.