

УДК 622.691.4:621.452.33

## ОПЫТ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТВД В СОСТАВЕ ИМПОРТНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ, ПРОШЕДШИХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ

А. А. Быбин<sup>1</sup>, А. В. Новиков<sup>2</sup>, А. В. Дементьев<sup>3</sup>, А. В. Артюхин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> anbybin@yandex.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>2,3</sup> ООО «Производственное предприятие «Турбинаспецсервис»

<sup>4</sup> ООО «Газпром трансгаз «Чайковский»

Поступила в редакцию 21.03.2013

**Аннотация.** Рассмотрено постэксплуатационное состояние рабочих лопаток ТВД импортных газоперекачивающих агрегатов. Установлено, что в результате наработки лопаток на агрегате в структуре основного металла и защитных покрытий имеются признаки потери работоспособности. Предложена технология восстановительного ремонта лопаток, включающая этапы восстановления структуры никелевого сплава и геометрического профиля лопаток, а также нанесения защитных покрытий взамен поврежденных. Представлены результаты исследования лопаток после проведения их ремонта и последующей эксплуатации. Показано, что разработанная технология обеспечивает работоспособность лопаток в течение заданного ресурса.

**Ключевые слова.** Рабочие лопатки турбины газоперекачивающего агрегата; повреждаемость лопаток; технология восстановительного ремонта

### ВВЕДЕНИЕ

Ресурс газовых турбин, эксплуатируемых в нефтегазовой и энергетической отраслях, во многом определяется работоспособностью лопаточного аппарата и, в первую очередь, рабочих лопаток турбины [1]. Лопатки изготавливаются из жаропрочных никелевых сплавов, способных в течение длительного времени сопротивляться значительным нагрузкам при высокой температуре. С целью повышения сопротивления газовой коррозии поверхность лопаток покрывается специальными защитными покрытиями. Несмотря на меры, предпринимаемые на стадии конструирования и изготовления турбинных лопаток, в процессе эксплуатации в условиях высоких нагрузок, температур и агрессивной среды лопатки расходуют свой ресурс и при определенной наработке снимаются с агрегата. В практике эксплуатации газовых турбин существует два подхода по определению срока, когда лопатки снимаются с изделия: планово-предупредительный и по фактическому состоянию [2–4]. Первый предусматривает эксплуатацию лопаток в течение определенного времени, после которого весь комплект лопаток вне зави-

симости от его состояния снимается с агрегата и заменяется на новый. Данный подход оправдан в рамках минимизации рисков выхода из строя лопаточного аппарата. Однако в зависимости от условий эксплуатации агрегата на компрессорной станции комплект лопаток может находиться в состоянии, пригодном для дальнейшей наработки на изделии. В этом случае приоритетным является подход оценки фактического состояния деталей и принятия на его основе решения о дальнейшей судьбе лопаток турбины. Данный подход предусматривает реализацию системы мероприятий, направленных на восстановление остаточного ресурса деталей, определение возможности восстановления тех или иных параметров лопаток и организацию соответствующих технологических воздействий на восстанавливаемый объект. Подход эксплуатации дорогостоящих деталей по их фактическому состоянию снижает финансовые затраты на приобретение новых комплектов, но и увеличивает риск преждевременного выхода из строя лопаток, материал которых находится в состоянии предразрушения. Несмотря на наличие повышенного риска, второй подход находит все

большее применение, особенно в практике ремонтно-восстановительных работ.

В данной статье представлены результаты опытно-промышленной эксплуатации лопаток турбины высокого давления по их фактическому состоянию с учетом проведения восстановительного ремонта деталей.

## 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

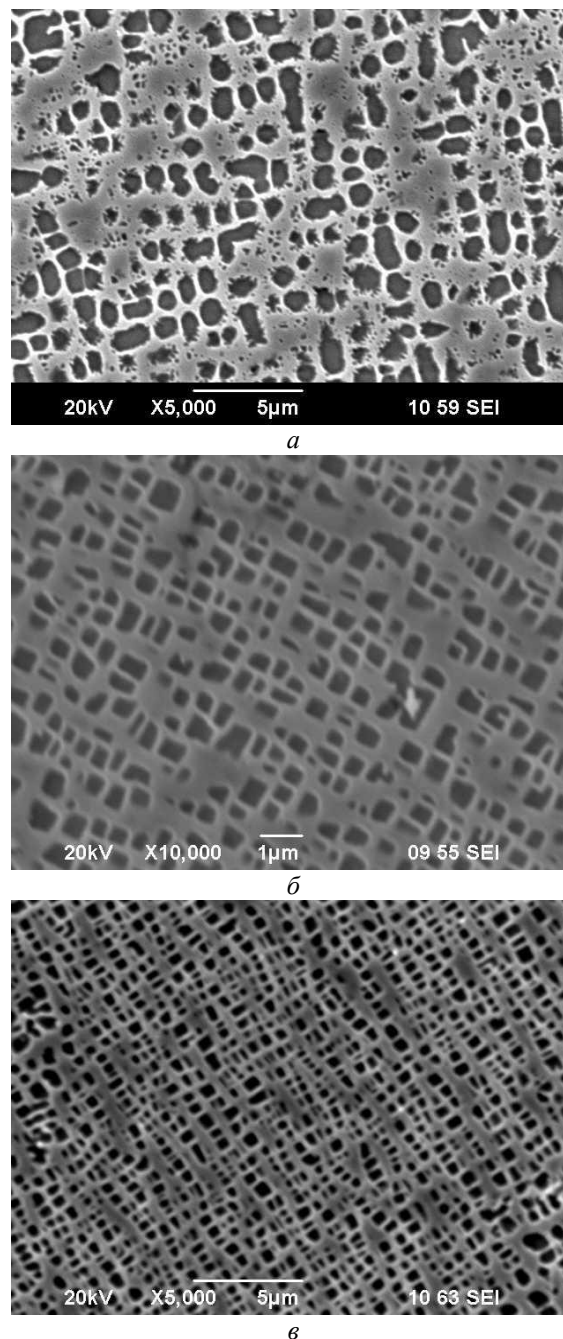
В качестве объекта исследования были выбраны рабочие лопатки турбины высокого давления газоперекачивающего агрегата ГТК-25И. Лопатки были изготовлены из никелевого сплава ЗМИ-3У. Для обеспечения их ресурса на профильную часть было нанесено электронно-лучевое антикоррозионное покрытие на кобальтовой основе, а на внутреннюю полость лопаток – диффузионное покрытие Ni–Al–Cr. Лопатки в составе агрегата эксплуатировались в течение 38,5 тыс. ч, после чего были сняты с эксплуатации в виду достижения наработки до первого ремонта.

Изучение структуры сплава и защитных покрытий проводили на образцах, вырезанных из лопаток в различном состоянии, с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6490LV. Химический состав исследуемых покрытий осуществляли путем микрорентгено-спектрального анализа на энергодисперсионном анализаторе Microtrace Series II (NORAN). Локальность анализа составляла  $25 \text{ мкм}^2$ , глубина анализа  $\sim 1 \text{ мкм}$ . Испытания образцов на одноосное растяжение выполняли в соответствии с ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 9651-84. Усталостные испытания проводили по ГОСТ 25.502-81 на консольных образцах прямоугольного сечения с симметричным циклом нагружения при комнатной температуре на вибростенде St-5000/300. Все образцы после испытаний подвергали контролю ЛЮМ-10В с целью выявления образовавшихся трещин.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью установления фактического состояния лопаток после эксплуатации и изучения возможности их ремонта была разработана система оценки ремонтпригодности лопаток. Данная система включает в себя комплекс неразрушающего и разрушающего контроля деталей, анализ условий эксплуатации и результатов лабораторных испытаний, что в совокупности позволяет оценить состояние лопаток и назначить соответствующий объем ремонтно-восстановительных работ.

С использованием разработанной системы был проанализирован комплект рабочих лопаток ТВД. Результаты исследования показали, что основной материал лопаток – жаропрочный сплав ЗМИ-3У – не удовлетворяет требованиям технических условий на лопатки: в первой части наблюдаются признаки выделения высокодисперсных частиц  $\gamma'$ -фазы (рис. 1).



**Рис. 1.** Микроструктура сплава ЗМИ-3У в различном состоянии: *а* – после эксплуатации; *б* – после проведения ВТО; *в* – после ремонта и последующей эксплуатации в течение 18,5 тыс. ч

Подобные выделения обуславливают пониженную прочность материала (табл.). Металло-

графический анализ состояния покрытия на поверхности проточной части лопатки выявил значительную коррозию электронно-лучевого покрытия Co-Cr-Al-Y (рис. 2, а). Дополнительно на поверхности внутренней полости лопатки также было выявлено наличие повреждения незащищенной поверхности сплава коррозией (рис. 2, б). Кроме повреждений основного металла лопаток и защитных покрытий при дефектации выявляются дефекты механического характера: забоины, вмятины, вырывы металла и др., появление которых вызвано попаданием в тракт изделия посторонних предметов. На основании полученных результатов было установлено, что лопатки ТВД исследуемого комплекта не могут продолжать дальнейшую эксплуатацию без восстановительного ремонта.

Таблица

**Уровень механических свойств  
в различном состоянии материала лопаток**

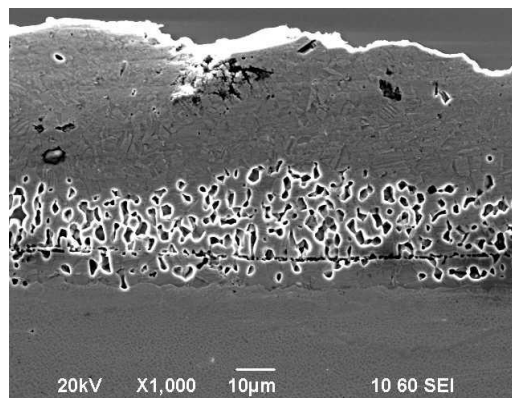
| Показатель       | Состояние материала |            |            |
|------------------|---------------------|------------|------------|
|                  | А                   | Б          | В          |
| $\sigma_b$ , МПа | <u>755</u>          | <u>886</u> | <u>845</u> |
|                  | 726                 | 826        | 842        |
| $\delta$ , %     | <u>3,9</u>          | <u>4,4</u> | <u>4,2</u> |
|                  | 4,0                 | 4,6        | 4,4        |

Примечание: А – после эксплуатации; Б – после проведения ВТО; В – после ремонта и последующей эксплуатации в течение 18,5 тыс. ч

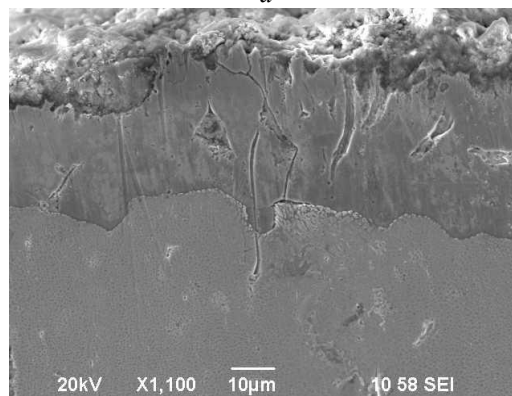
Объем исследований лопаток в постэксплуатационном состоянии позволил назначить минимально необходимый объем восстановительных работ. Учитывая наличие начальных признаков деградации структуры никелевого сплава и проникновение фронта коррозии на значительную глубину в защитном покрытии, была разработана маршрутная технология восстановительного ремонта, представленная на рис. 3.

Наиболее ответственными этапами предлагаемой технологии ремонта являются операции удаления дефектных покрытий, восстановительной термической обработки лопаток в вакууме, микроплазменной наплавки специальными порошками, нанесения защитных покрытий на наружную поверхность и на поверхность внутренней полости пера лопатки. С целью обеспечения стабильности результатов, достигаемых с использованием реализуемых процессов, был проведен комплекс исследовательских работ, направленный на отработку технологий восстановительного ремонта. Так, для решения вопросов удаления поврежденных коррозией покрытий был предложен комбинированный способ, включающий активизацию поверхности

путем струйной абразивно-жидкостной обработки, химическое разрыхление дефектных слоев, сьем подтравленного слоя путем размерной абразивной обработки. Данный способ позволяет при минимальном времени обработки обеспечить приемлемое качество поверхности, с которой удаляется покрытие. Качество удаления покрытия оценивалось путем проведения электролитно-плазменного дефектоскопического травления. Данный метод заключается в погружении на 0,9...1 мин в нетоксичный электролит лопаток, находящихся под высоким напряжением. В таких условиях вокруг лопатки возникает парогазовая оболочка, в которой реализуются химические, электрохимические, гидродинамические и другие процессы, приводящие к активизации поверхности и удалению минимального слоя металла. После завершения процесса электролитно-плазменной обработки на поверхности визуально обнаруживаются участки, с которых полностью удалено покрытие, и – в случае некачественной обработки – участки с наличием остатков покрытия.



а



б

**Рис. 2.** Микроструктура покрытия с наличием коррозионных повреждений:  
а – на проточной части лопатки;  
б – на поверхности внутренней полости

Таким образом, процесс электролитно-плазменного дефектоскопического травления позволяет за короткое время обеспечить высокую результативность и достоверность результатов контроля всего комплекта лопаток.

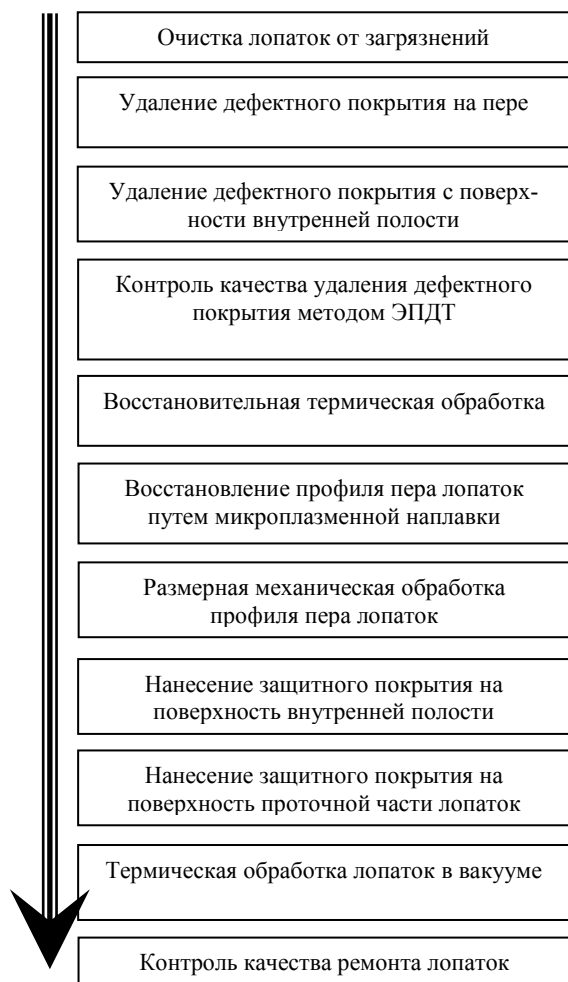


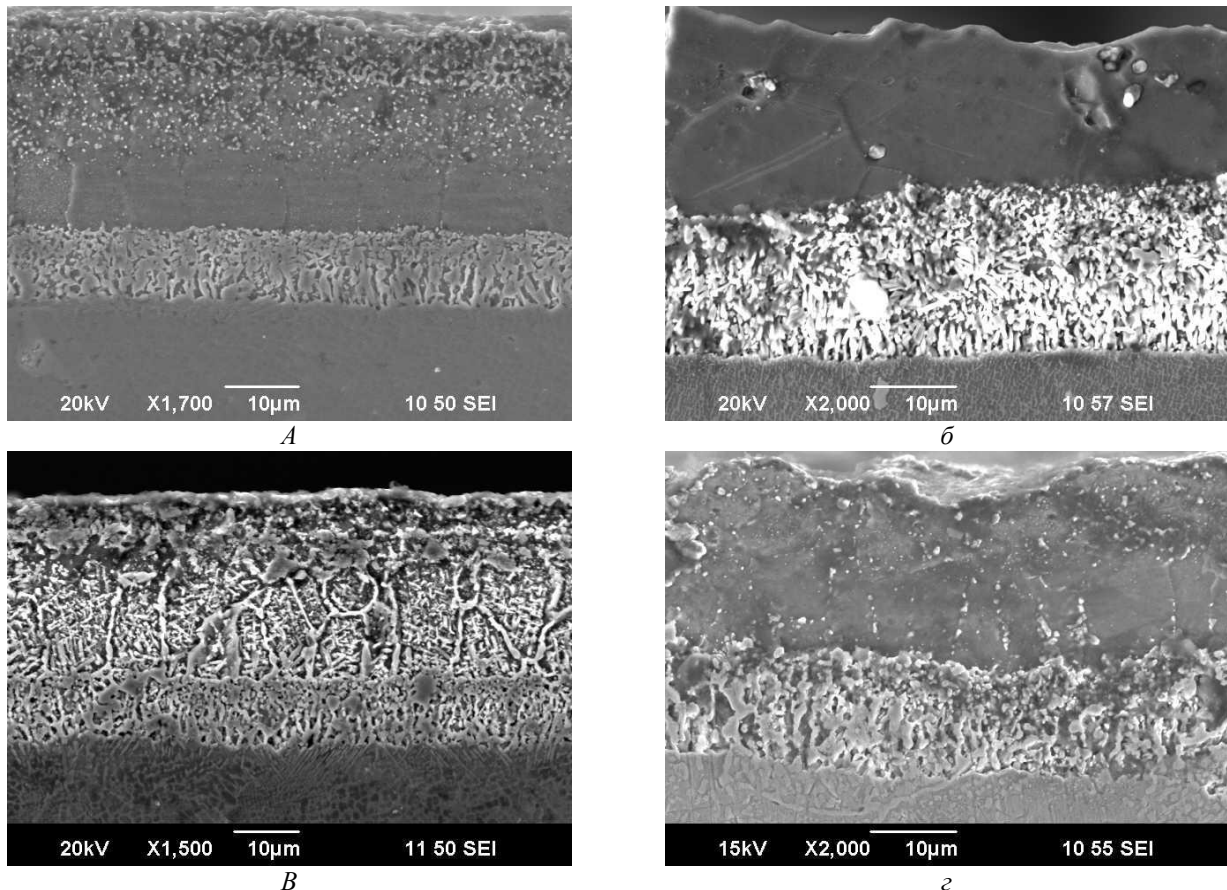
Рис. 3. Схема маршрута восстановительного ремонта рабочих лопаток ТВД

Для восстановления структуры никелевого сплава, близкой к исходной, был разработан специальный режим термической обработки лопаток в вакуумной среде, отличительным признаком которого является отсутствие коробления лопаток с окончательно изготовленной хвостовой и перовой частью. Режим регламентирует скорости нагрева и охлаждения до температуры гомогенизации сплава и ограничивает время нахождения металла в зоне температур, вызывающих повышенную диффузию легирующих элементов сплава. В результате проведения восстановительной термообработки структура лопаток соответствует требованиям технических условий на детали (рис. 1, б), что также подтверждается результатами механических испытаний (табл.).

Для устранения забоин, вмятин и других дефектов механического характера была применена микроплазменная порошковая наплавка, выполняемая на роботизированном специализированном участке. Как указывается в работах [5–7], сочетание низких удельных тепловложений (100...650 Вт), низкой плотности тепловой энергии в эквивалентном пятне нагрева (150...1500 Вт/см<sup>2</sup>) и малых скоростей перемещения микроплазменной дуги обеспечивает медленное охлаждение никелевого сплава в температурных интервалах хрупкости со скоростями до 3...10 °С/с. В указанных условиях темп нарастания деформаций не превышает критических значений и возникновение горячих трещин в наиболее опасной зоне основного металла маловероятно.

Защитные покрытия, наносимые на лопатку, должны обеспечивать ее долговечность в течение заданной наработки. Анализ условий и возможных сроков эксплуатации восстанавливаемых лопаток показал, что для ремонтируемого комплекта деталей может быть предложено нанесение легированных диффузионных покрытий алюминидного типа. Нанесение указанных покрытий на проточную часть лопатки наносилось в вакууме путем распыления катода регламентированного состава, а на поверхности внутренней полости проводилось хромоалитирование в вакууме с одновременной термической обработкой лопаток. Данные процессы обеспечивают получение защитных слоев с гарантированно высокой адгезией и оптимальным по параметру сопротивления газовой коррозии содержанием легирующих элементов (рис. 4).

Комплект лопаток, восстановленный по предложенной схеме, был принят на опытно-промышленную эксплуатацию в составе агрегата ГТК-25И на КС «Ординская» ООО «Газпром трансгаз Чайковский». Суммарная наработка лопаток после ремонта составила 18565 часов. В процессе эксплуатации проводились осмотры лопаток через лючки, в ходе которых каких-либо визуальных повреждений лопаток выявлено не было. После работы лопаток в составе агрегата комплект был снят для принятия решения о дальнейшей возможности эксплуатации комплекта. Визуально-измерительный контроль деталей отклонений от требований ремонтной документации не выявил. От данного комплекта для проведения всестороннего исследования случайным образом были отобраны три лопатки. В результате исследования лопаток установлено, что структура сплава находится в удовлетворительном состоянии (рис. 1, в).



**Рис. 4.** Микроструктура защитного покрытия: *а, в* – на проточной части лопатки; *б, з* – на поверхности внутренней полости; *а, б* – после проведения ремонтно-восстановительных работ; *в, з* – после ремонта и последующей эксплуатации в течение 18,5 тыс. ч

Размер вторичной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы колеблется от 0,3 до 0,7 мкм, дисперсные карбиды по границам зерен имеют благоприятную морфологию, формирование карбидной сетки не наблюдается. Об удовлетворительном состоянии материала лопаток свидетельствуют и результаты механических испытаний, показавших сохранение прочности и пластичности материала на достаточно высоком уровне. Испытаниями материала лопаток на многоцикловую усталость установлен предел выносливости, равный 180 МПа (база  $N_d = 20 \times 10^6$ ).

Защитные покрытия диффузионного типа, нанесенные при ремонте на проточную часть пера лопатки и на поверхность внутренней полости, подтвердили свою работоспособность, обеспечив заданный ресурс деталей. После эксплуатации изменение толщины покрытия незначительно: на проточной части происходит ее увеличение на 15...20%, а на поверхности внутренней полости толщина покрытия практически не изменяется, что связано с конструктивными особенностями рабочих лопаток ТВД с агрегата ГТК-25И. После наработки свыше 18,5 тыс. ч в покрытиях наблюдаются признаки диф-

фузионных процессов, обусловивших формирование фазы  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al по границам блоков  $\beta$ -фазы NiAl. Кроме того, внутри блоков  $\beta$ -фазы отмечаются признаки мартенситного превращения, о чем также свидетельствует и несколько повышенная твердость покрытия ~ 8500 МПа. Протекание мартенситных превращений вызвано высокой скоростью охлаждения с высоких температур. Несмотря на указанные процессы, запас алюминия в покрытиях составляет 18...20%.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты о состоянии отремонтированных лопаток после повторной длительной эксплуатации показывают, что детали, находясь в сложных условиях эксплуатации, в целом остались в удовлетворительном состоянии и способны отработать в составе агрегата еще дополнительно 8...10 тыс. ч. Вместе с тем, учитывая объем структурно-фазовых изменений в защитных покрытиях, целесообразным является проведение «легкого» ремонта, связанного с перепокрыванием деталей. Применение такого приема позволит гарантировать дальнейшую

работоспособность лопаток в течение последующих 18 тыс. ч.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гецов Л. Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин: в 2 кн. Рыбинск: ООО «Изд. дом «Газотурбинные технологии», 2010. Кн. 1. 611 с.
2. **Бронштейн Л. С.** Ремонт стационарной газотурбинной установки. Л.: Недра, 1987. 143 с.
3. **Моверман Г. С., Радчик И. И.** Ремонт импортных газоперекачивающих агрегатов. М.: Недра, 1986. 197 с.
4. **Шайхутдинов А. З.** Разработка и модернизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Казань: ООО «Слово», 2007. 339 с.
5. **Калина П. П., Яровицын А. В., Ющенко К. А.** Особенности процесса микроплазменной порошковой наплавки // Автоматическая сварка. 2005. № 4. С. 9–15.
6. **Особенности** малоамперной аргонодуговой и микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку / А. В. Яровицын, К. А. Ющенко, А. А. Наконечный, И. А. Петрик // Автоматическая сварка. 2009. № 6. С. 37–46.
7. **Разработка** технологии ремонтной микроплазменной порошковой наплавки торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. В. Яровицын [и др.] // Автоматическая сварка. 2010. № 8. С. 25–29.

#### ОБ АВТОРАХ

**Быбин Андрей Александрович**, доц. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж. по автоматиз. технол. процессов и производств (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по тепл., электротехн. двиг. и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. технологий восстановительного ремонта деталей газовых турбин.

**Новиков Антон Владимирович**, ген. директор ООО «Производственное предприятие «Турбинаспецсервис». Дипл. инж. по технологии и машинам сварочн. производства (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. ремонта газотурбинной техники.

**Деметьев Алексей Владимирович**, нач. исслед. отдела ООО «Производственное предприятие «Турбинаспецсервис». Дипл. инж.-физик (УГАТУ, 2008). Иссл. в области термической обработки материалов для газотурбинной техники

**Артюхин Алексей Викторович**, вед. инж. ПОЭКС ООО «Газпром Трансгаз Чайковский». Дипл. инж. по технологии машиностроения (УПИ, 1993). Иссл. в обл. эффективной эксплуатации газовых турбин.

#### METADATA

**Title:** Experience of industrial exploitation of the working turbine blades HPT in structure of import of gas pumping units after last reconditioning.

**Authors:** A.A. Bybin<sup>1</sup>, A.V. Novikov<sup>2</sup>, A.V. Demytyev<sup>3</sup>, A. V. Artyukhin<sup>4</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>2,3</sup> Turbinaspetservice Manufacturing Enterprise (TSS), Russia.

<sup>4</sup> Gazprom Transgaz Tchaikovsky, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>anbybin@yandex.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 4 (57), pp. 18-23, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The post-operational condition of working turbine blades of HPT of import gas-distributing units is considered. It is established that as a result of an operating time of turbine blades on the unit in structure of the main metal and sheetings there are signs of loss of working capacity. The technology of recovery repair of the turbine blades, including stages of restoration of structure of a nickel alloy and a geometrical profile of turbine blades, and also drawings sheetings instead of the damaged is offered. Results of research of shovels after carrying out their repair and the subsequent operation are presented. It is shown that the developed technology provides operability of turbine blades during the set resource.

**Key words:** Working turbine blades of the turbine of the gas-distributing unit; damageability of turbine blades; technology of recovery repair.

#### References (English Transliteration):

1. L. B. Getsov, *Materials and Durability of Details of Gas Turbines* (in Russian), vol. 1. Rybinsk: Gazoturbinnye Tekhnologii Publishing House, 2010.
2. L. S. Bronstein, *Repair of Stationary Gas-Turbine Installation* (in Russian). Leningrad: Nedra, 1987.
3. G. S. Moverman and I. I. Radchik. *Repair of Import Gas-Distributing Units* (in Russian). M: Nedra, 1986, 197 p.
4. A. Z. Shaykhtudinov, *Development and Modernization of Gas-Distributing Units with the Gas-Turbine Drive* (in Russian). Kazan: Slovo, 2007.
5. P. P. Kalina, A. V. Yarovitsyn, and K. A. Yushchenko, "Features of process of a microplasma powder naplavka," (in Russian), *Avtomaticheskaya svarka*, 2005, No. 4, p.p. 9-15.
6. A. V. Yarovitsyn, K. A. Yushchenko, A. A. Nakonechny, and I. A. Petrik, *Features of the low-ampere of a slangenodugovoy and microplasma powder naplavka on a narrow substrate*, (in Russian), *Avtomaticheskaya svarka*, no. 6, pp. 37-46, 2009.
7. K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, A.V. Yarovitsyn, *et al.* Development of technology of a repair microplasma powder naplavka of end faces of bandage shelves of working shovels of TVD of the aviation engine, (in Russian), *Avtomaticheskaya svarka*, no. 8, pp. 25-29, 2010.

#### About authors:

1. **Bybin, Andrey Aleksandrovich**, Dept. of Technologies of Mechanical Engineering. Dipl. Engineer in automation of technological processes and productions (UGATU, 2000). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2005).
2. **Novikov, Anton Vladimirovich**. Director General. Dipl. Engineer in technology and cars of welding production (UGATU, 2005).
3. **Demytyev, Aleksey Vladimirovich**. Chief of research department. Dipl. engineer-physicist (UGATU, 2008).
4. **Artyukhin, Aleksey Viktorovich**. Leading engineer. Dipl. Engineer in technologies of mechanical engineering (Ural State Univ., 1993).