

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 621.79.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ОТ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю.* , Савушкин А.Н.

*Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
Государственный научный центр Российской Федерации,
ВИАМ, ул. Радио, 17, Москва, 105005, Россия*

** e-mail: nikitinyj@viam.ru*

Статья поступила в редакцию 25.01.2019

В продолжении ранее проведенных работ исследовано влияние химического удаления углеродсодержащих загрязнений на характеристики длительной прочности титанового сплава ВТ20. Установлено, что химическая очистка образцов исследуемыми растворами не приводит к снижению прочности и пластичности. Опробовано удаление углеродсодержащих загрязнений с поверхности компрессорных лопаток ГТД с помощью очищающего раствора № 1. Показано, что указанный раствор позволяет полностью удалить загрязнения, не приводит к ухудшению микротвердости и топографии поверхности, а также позволяет повысить активность (потенциал) поверхности лопатки в сравнении с состоянием после эксплуатации.

Ключевые слова: лопатки, растворы, эксплуатационные загрязнения, прочность, пластичность, шероховатость, контактная разность потенциалов, восстановление, титановые сплавы.

Введение

Одной из важнейших задач современного материаловедения является реализация полного жизненного цикла материала: разработка – эксплуатация – диагностика, ремонт, продление ресурса – утилизация [1–3]. Обширное использование газотурбинной техники в течение многих десятилетий, как в авиационной, так и в энергетической промышленности, обуславливает необходимость ее своевременного обслуживания и ремонта. При

ремонте газотурбинных двигателей (ГТД) в первую очередь приходится сталкиваться с удалением различного рода загрязнений с деталей и узлов, в том числе с удалением углеродсодержащих загрязнений с поверхности лопаток из титановых сплавов, используемых, как правило, в компрессоре ГТД [4–6]. Помимо эффективного удаления загрязнений достаточно важно, чтобы процесс очистки не приводил к снижению физико-механических характеристик материала. В связи с от-

сутствием в литературных источниках [7—16] каких-либо данных о влиянии способов удаления загрязнений на свойства титановых сплавов, специалистами ФГУП «ВИАМ» были проведены работы по исследованию изменения свойств образцов титанового сплава ВТ20 после удаления углеродсодержащих загрязнений с использованием различных химических технологий [17, 18]. Однако в указанных работах не проводилась оценка изменения прочностных свойств очищенных образцов при длительном статическом нагружении при повышенной температуре, а также не проводилось опробование химических технологий удаления загрязнений на реальных деталях.

Целью настоящей работы являлось исследование длительной прочности образцов титанового сплава ВТ20, а также оценка изменения некоторых свойств поверхности компрессорных лопаток после удаления углеродсодержащих загрязнений химическими способами.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.9 «Припои и технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами для формирования оптимальной структуры паяного соединения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

Объекты и методы исследования

Из листового полуфабриката титанового сплава ВТ20 были изготовлены стандартные плоские образцы для определения характеристик длительной прочности. На часть образцов, по технологии, разработанной ФГУП «ВИАМ», были нанесены углеродсодержащие загрязнения, имитирующие эксплуатационные.

В работе использовались титановые компрессорные лопатки ГТД: лопатка № 1 (маленькая) после эксплуатации с небольшим количеством загрязнений на поверхности и лопатка № 2 (большая), на которую были нанесены загрязнения, имитирующие эксплуатационные.

В качестве химических способов очистки образцов от углеродсодержащих загрязнений с учетом результатов ранее проведенных исследований были выбраны следующие растворы: очищающий раствор № 1 на водной основе по ПИ 1.2.118 (РФ), щелочной и кислотный растворы («рыхление + травление») (РФ), щелочной очиститель HDL 202 (Канада).

Испытания образцов на длительную прочность проводили на испытательной машине Zwick Карра

50 LA в соответствии с ГОСТ 10145-81 при напряжении 620 МПа и температуре 450 °С.

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) поверхности лопаток проводили на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10, оснащённом энергодисперсионным спектрометром «Х-Мах» (Oxford Instruments). Измерение шероховатости (Ra) по ГОСТ 2789-73 проводили методом конфокальной микроскопии на 3D оптическом профилометре Plu Neox Sensofar-Tech при увеличении $\times 10$. Микротвердость поверхности определяли по методу Виккерса на приборе Emcotest Durascan путем расчета величины площади отпечатка внедряемого индентора при заданной и постоянной нагрузке 0,981 Н в течение 15 с. В качестве индентора применялась четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине, равным 136°. Активность поверхности определяли по контактной разности потенциалов с помощью прибора «Поверхность».

Результаты исследования

Оценка эффективности очистки поверхности образцов титанового сплава ВТ20 от углеродсодержащих загрязнений зарубежными и отечественными растворами и оценка изменения свойств показали, что наилучшей очищающей способностью обладают очищающий раствор № 1 на водной основе, щелочной и кислотный растворы («рыхление + травление») и раствор HDL 202 [18]. Указанные технологии не приводят к ухудшению топографии поверхности и кратковременной прочности. Для определения характеристик длительной прочности после удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности образцов титанового сплава ВТ20 с помощью вышеуказанных растворов были проведены испытания на длительную прочность при температуре 450 °С и напряжении 620 МПа. Уровень напряжений был выбран исходя из паспортных характеристик данного сплава. Параллельно при тех же параметрах были проведены испытания образцов в исходном состоянии и с загрязнениями на поверхности. В процессе испытаний устанавливали время до разрушения, относительное удлинение, а также фиксировали деформацию образцов. Результаты испытаний представлены в табл. 1. Пример полученной кривой ползучести показан на рис. 1.

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что вне зависимости от вида применяемого раствора не происходит значительного изменения времени до разрушения и пластичности образцов. Аналогичное время до разрушения и пластичность

Таблица 1

**Длительная прочность образцов титанового сплава ВТ20 (при температуре 450 °С)
после удаления загрязнений различными растворами**

Название раствора	Постоянно приложенное напряжение σ , МПа	Время до разрушения τ_r , ч	Относительное удлинение δ , %
Без обработки (исходное состояние)	620	153	34
С загрязнениями		148	30
Очищающий раствор № 1		159	35
«Рыхление + травление»		150	32
HDL 202		143	33

Примечание: приведены средние значения.

имеют исходные образцы и образцы с загрязнениями. Имеющийся разброс по времени до разрушения незначителен и характерен для данного вида испытаний.

Кривые ползучести принципиально не различаются. На всех кривых наблюдаются три типичных участка, отвечающие трем стадиям развития ползучести: 1 — начальная стадия с уменьшающейся скоростью ползучести; 2 — с постоянной и наименьшей скоростью и 3 — заключительная, с возрастающей скоростью ползучести.

Следует отметить, что после удаления углеродсодержащих загрязнений с использованием данных растворов на образцах титанового сплава

ВТ20 активность (потенциал) поверхности несколько ниже, чем на исходных образцах (без загрязнений). Наиболее близкое значение активности поверхности к исходному состоянию обеспечивает очищающий раствор № 1. Раствор HDL 202, щелочной и кислотный растворы могут приводить к небольшой потере массы основного металла при удалении загрязнений [17].

На основании вышесказанного для опробования удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности лопаток компрессора ГТД был выбран очищающий раствор № 1.

Исследования проводили на титановых компрессорных лопатках: лопатке № 1 (маленькая)

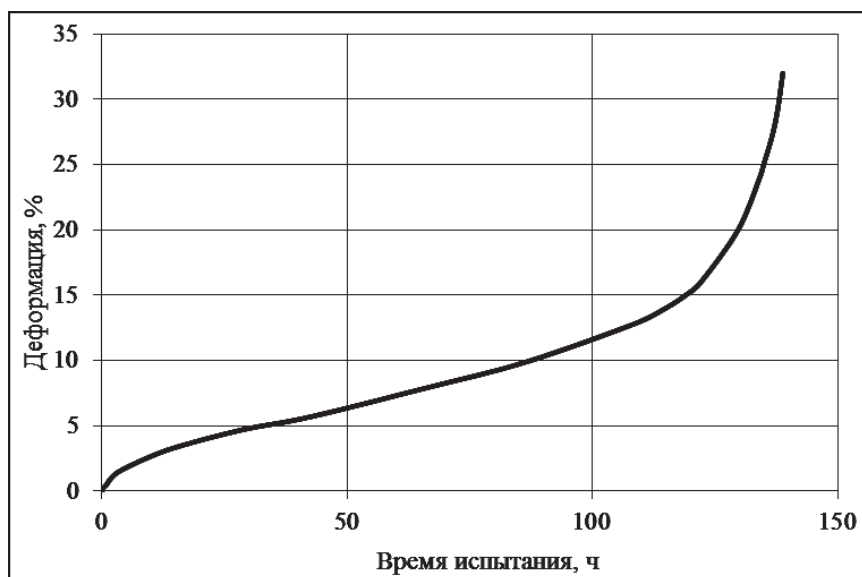


Рис. 1. Кривая ползучести образца титанового сплава ВТ20 (очищенного от загрязнений раствором HDL 202), полученная при испытании на длительную прочность при температуре 450 °С и напряжении 620 МПа

после эксплуатации с небольшим количеством загрязнений на поверхности (рис. 2,а) и лопатке № 2 (большая), на которую были нанесены загрязнения, имитирующие эксплуатационные, в лабораторных условиях (рис. 3,а,б).

До и после удаления загрязнений был определен качественный химический состав поверхно-

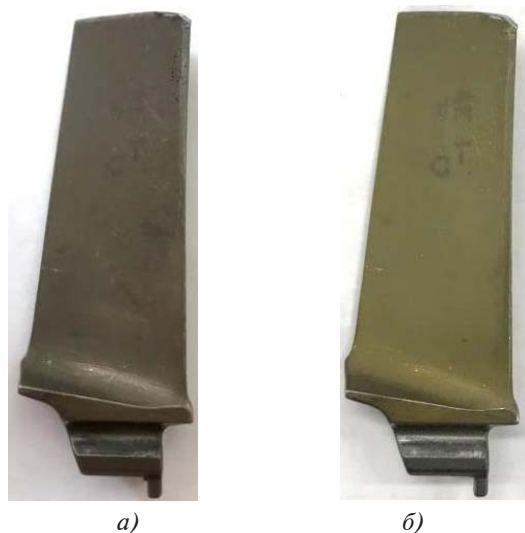


Рис. 2. Вид лопатки № 1: а — после эксплуатации; б — после удаления загрязнений



Рис. 3. Вид лопатки № 2: а — в исходном состоянии; б — после нанесения загрязнений; в — после удаления загрязнений

сти, микротвердость, шероховатость и активность поверхности. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2. Вид лопаток после удаления загрязнений показан на рис. 2,б и 3,в.

Значения шероховатости поверхности после очистки не изменяются, как для лопатки № 1, так и для лопатки № 2. Профили типичных участков поверхности лопатки № 2 до и после очистки представлены на рис. 4. Обработка в очищающем растворе № 1 благоприятно сказывается на активности (потенциале) поверхности лопатки № 1, о чем свидетельствует повышение значений контактной разности потенциалов. Активность поверхности лопатки № 2 после очистки ниже исходного состояния примерно на 10 %. Удаление загрязнений с поверхности лопаток № 1 и № 2 не приводит к газонасыщению поверхностных слоев, о чем свидетельствуют полученные значения микротвердости до и после обработки, которые находятся на одном уровне.

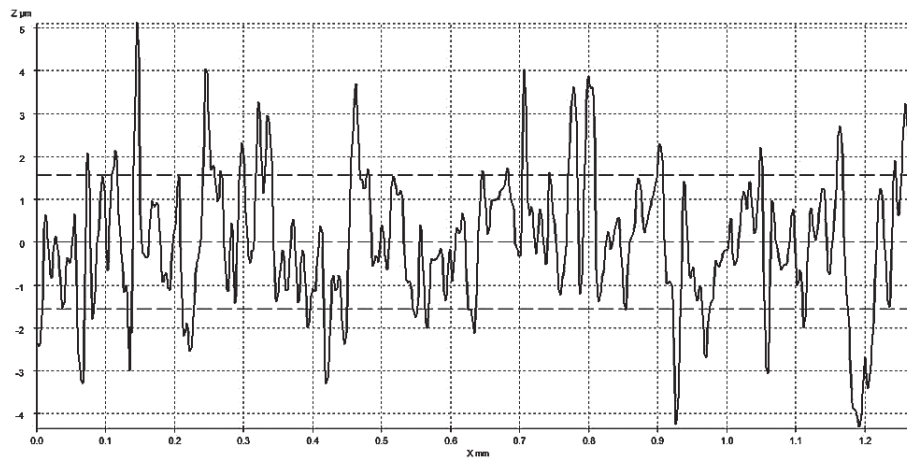
В спектрограммах, полученных с поверхности лопатки № 1 при РСМА до очистки, наблюдается наличие таких элементов, как сера, кислород и углерод, свидетельствующие о наличии углеродсодержащих загрязнений (рис. 5,а). После обра-

Таблица 2

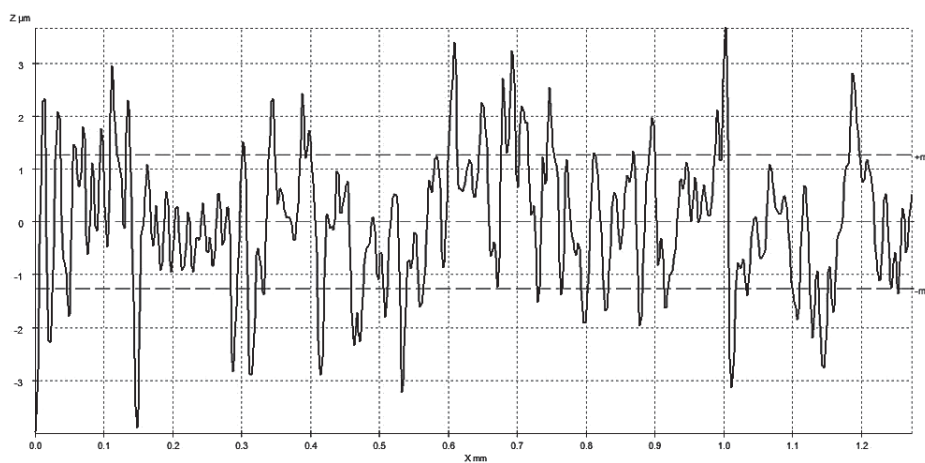
Состояние поверхности титановых лопаток компрессора ГТД после удаления углеродсодержащих загрязнений

Наименование лопатки	Микротвердость НV		Шероховатость Ra,мкм		Потенциал поверхности, В	
	Исходная	После очистки	Исходная	После очистки	Исходный	После очистки
Лопатка № 1	382	386	1,00	1,00	0,20	0,28
Лопатка № 2	393	384	1,60	1,60	0,27	0,24

Примечание: приведены средние значения.



а)



б)

Рис. 4. Профили типичного участка поверхности лопатки № 2: а — в исходном состоянии; б — после удаления загрязнений очищающим раствором № 1

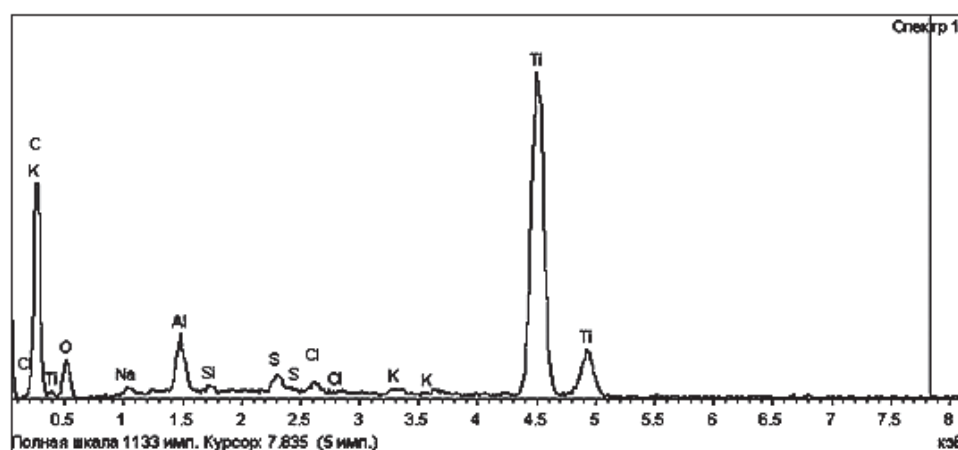
ботки данной лопатки в очищающем растворе № 1 на водной основе поверхность лопатки стала светлее (см. рис. 2, б), а в спектрограммах наблюдаются только химические элементы, входящие в состав сплава (рис. 5, б), что свидетельствует о полном удалении эксплуатационных загрязнений. Аналогичные результаты получены и после обработки в указанном растворе лопатки № 2. Результаты исследований, полученные на компрессорных лопатках, хорошо согласовываются с данными исследований, проведенных на образцах.

Выводы

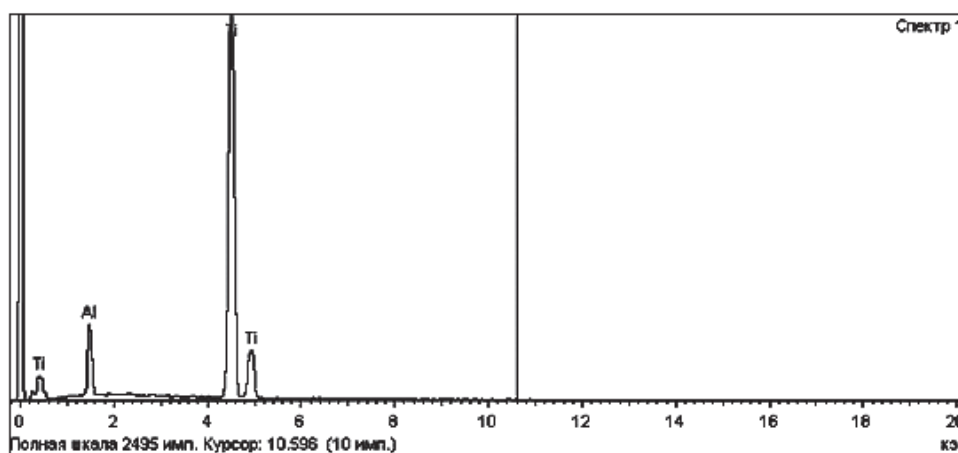
Выбранный для опробования очищающий раствор № 1 обеспечивает полное удаление углеродсодержащих загрязнений с поверхности компрессорных лопаток. При этом не происходит изменение микрогеометрии поверхности лопатки и ее газонасыщение. Значения поверхностного потенциала лопаток, полученные после примене-

ния указанного раствора, достаточно хорошо соотносятся с рекомендациями приведенными в патенте [20], в котором указывается, что для титановых сплавов контактная разность потенциалов должна быть не ниже 0,24 В.

На основании исследований, в том числе проведенных ранее, можно сказать, что оптимальным для применения является очищающий раствор № 1, который обеспечивает полную очистку загрязненных деталей (образцов) без потери массы основного металла, изменения макроструктуры, микрогеометрии поверхности и ухудшения механических свойств, а именно увеличения поверхностной микротвердости, снижения прочности и пластичности, в том числе при длительном нагружении при повышенных температурах. Указанная технология в сравнении с другими очищающими растворами обеспечивает также оптимальные значения потенциала поверхности.



а)



б)

Рис. 5. Спектрограммы, полученные с типичного участка поверхности лопатки № 1: а — после эксплуатации; б — после удаления загрязнений очищающим раствором № 1

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. № 10-11(726). С. 23–32.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7-17.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки — основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8-18.
4. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю. Современное состояние вопроса в области очистки проточной части компрессора ГТД от эксплуатационных загрязнений (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 3(51). С. 45-54. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1078.pdf> DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5
5. Панин П.В., Дзунович Д.А., Лукина Е.А. Влияние легирования водородом на технологическую пластичность и текстуру листовых полуфабрикатов из титанового сплава BT23 // Труды ВИАМ. 2018. № 7(67). С. 58-68. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1280.pdf> DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-58-68
6. Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Лукина Е.А., Новак А.В. Структура и свойства листовых полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных титановых сплавов разных классов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2(51). С. 17-25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25
7. Чистка с использованием сухого льда (бластинг), http://www.elmemesser.ru/ru_RU/use-cases/industry/dry-ice
8. Михайлов Д.А., Недашковский А.П., Ивченко Т.Г. Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий // Прогресивні технології і системи машинобудування. 2014. № 1(47). С. 213-224.

9. Новиков В.В., Шитарев И.Л., Перепелица А.Н., Прошутин В.А., Елизаров И.А. Способ очистки проточной части газотурбинного двигателя. Патент RU 2280773 С1. Бюлл. № 21, 27.07.2006.
10. Губин Г.П. Способ сухой очистки поверхностей лопаток компрессора. Патент RU 2513525 С2. Бюлл. №11, 20.04.2014.
11. Доценко Г.Н. Разработка принципов очистки деталей авиационной техники от нагароподобных загрязнений биотехнологическим методом: Дисс. ... канд. тех. наук. — М., 2000. — 206 с.
12. Ogbonnaya E.A. Gas turbine performance optimization using compressor online water washing technique // *Engineering*. 2011. № 3, pp. 500-507. DOI: 10.4236/eng.2011.35058
13. Boyce M.P., Gonzalez F. A Study of On-Line and Off-Line Turbine Washing to Optimize the Operation of a Gas Turbine // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007. Vol. 129. No. 1, pp. 114-122. DOI: 10.1115/1.2181180
14. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Кривина Л.А. Повышение надежности и ресурса компрессорных лопаток газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов // *Вестник научно-технического развития*. 2011. № 2(42). С. 57-62.
15. Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н., Теряев Д.А., Быценко О.А., Ширваньянц Г.Г. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для восстановления эксплуатационных свойств лопаток газотурбинных двигателей // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2014. № 1. С. 43-49.
16. Igie U., Pilidis P., Fouflias D., Ramsden K., Laskaridis P. Industrial gas turbine performance: compressor fouling and on-line washing // *Journal of Turbomachinery*. 2014. Vol. 136. Issue 10, 13 p. DOI: 10.1115/1.4027747
17. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Григоренко В.Б., Козлов И.А. Изменения свойств поверхности титанового сплава VT20 при химическом удалении эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10. С. 41-48. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1163.pdf> DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-5-5
18. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Гудков С.В., Савушкин А.Н. Оценка свойств титанового сплава VT20 после удаления эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений химическим способом // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 4. С. 195-202.
19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1(34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
20. Олешко В.С. Способ подготовки поверхности металлических деталей к оперативному выявлению прижогов измерением работы выхода электрона. Патент RU 2488093 С1. Бюлл. № 20, 20.07.2013.

EXPLORING THE PROPERTIES CHANGES OF THE TITANIUM ALLOY BLADES SURFACE AFTER CHEMICAL CLEANING FROM CARBONACEOUS IMPURITIES

Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu.* , Savushkin A.N.

*All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials,
State Research Center of the Russian Federation,
VIAM, 17, Radio str., Moscow, 105005, Russia
* e-mail: nikitinyj@viam.ru*

Abstract

It is important to understand how a cleaning technology can change the physico-chemical properties of the material being cleaned after removing carbonaceous impurities from the compressor parts surface of a gas turbine engine. In continuation of the previous work, the creep of VT20 titanium alloy samples was examined, and one of the selected chemical technologies that remove carbonaceous impurities was tested on compressor blades with subsequent determination of some surface properties.

To evaluate the creep of VT20 titanium alloy characteristics, the standard flat samples, some of

which were coated with carbonaceous impurities that simulate exploitation, were fabricated. Two titanium compressor blades of a gas turbine engine were used in the research work: blade 1 (small) after operation with a small amount of contaminants on the surface, and blade 2 (large), on which carbonaceous impurities, imitating operation, were coated.

The creep tests results proved that the impurities removal by cleaning solution No. 1, alkaline and acid solutions (“loosening + etching”), and HDL 202 did not reduce the time of the samples destruction and degraded their plasticity, compared to the original samples.

Allowing for the results of the previous work, cleaning solution No. 1 was selected for testing the of carbonaceous impurities removal from the surface of the blades. The results of blades processing revealed that the surface was completely cleaned. In in X-ray microanalysis spectrograms the elements such as sulfur, oxygen and carbon, indicative of the presence of carbonaceous impurities, are missing. The values of surface roughness and micro-hardness did not sustain significant changes. Processing in the indicated solution leads to activity (potential) increase of the of blade No. 1 surface. The lower values of the blade No. 2 surface potential were observed (about 10%) compared to the initial state

Keywords: blades, solutions, operational pollution, strength, plasticity, roughness, contact potential difference, recovery, titanium alloys.

References

- Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomborg B.S. *Avtomaticheskaya svarka*, 2013, no. 10-11(726), pp. 23–32.
- Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. S, pp. 7-17.
- Kablov E.N. *Kryl'ya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8-18.
- Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu. *Trudy VIAM*, 2017, no. 3(51), pp. 45-54. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1078.pdf> DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5
- Panin P.V., Dzunovich D.A., Lukina E.A. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7(67), pp. 58-68. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1280.pdf> DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-58-68
- Dzunovich D.A., Alekseev E.B., Panin P.V., Lukina E.A., Novak A.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2(51), pp. 17-25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25
- Chistka s ispol'zovaniem sukhogo l'da (blasting)*, http://www.elmemesser.ru/ru_RU/use-cases/industry/dry-ice
- Mikhailov D.A., Nedashkovskii A.P., Ivchenko T.G. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*, 2014, no. 1(47), pp. 213-224.
- Novikov V.V., Shitarev I.L., Perepelitsa A.N., Proshutin V.A., Elizarov I.A. *Patent RU 2280773 C1*, 27.07.2006.
- Gubin G.P. *Patent RU 2513525 C2*, 20.04.2014.
- Dotsenko G.N. *Razrabotka printsipov ochistki detalei aviatsionnoi tekhniki ot nagaropodobnykh zagryaznenii biotekhnologicheskim metodom* (Developing principles for aviation engineering parts cleaning from sludge impurities by biotechnological method), Moscow, MSTUCA, 2000, 206 p.
- Ogbonnaya E.A. Gas turbine performance optimization using compressor online water washing technique. *Engineering*, 2011, no. 3, pp. 500-507. DOI: 10.4236/eng.2011.35058
- Boyce M.P., Gonzalez F.A Study of On-Line and Off-Line Turbine Washing to Optimize the Operation of a Gas Turbine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, vol. 129, no. 1, pp. 114-122. DOI: 10.1115/1.2181180
- Tarasenko Yu.P., Tsareva I.N., Krivina L.A. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2011, no. 2(42), pp. 57-62.
- Shulov V.A., Engel'ko V.I., Gromov A.N., Teryaev D.A., Bytsenko O.A., Shirvan'yants G.G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*, 2014, no. 1, pp. 43-49.
- Igie U., Pilidis P., Fouflias D., Ramsden K., Laskaridis P. Industrial gas turbine performance: compressor fouling and on-line washing. *Journal of Turbomachinery*, 2014, vol. 136, issue 10, 13 p. DOI: 10.1115/1.4027747
- Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu., Grigorenko V.B., Kozlov I.A. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10, pp. 41-48. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1163.pdf> DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-5-5
- Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu., Gudkov S.V., Savushkin A.N. VT20 titanium alloy properties estimation after removing of operational carbonaceous impurities by chemical means. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 195-202.
- Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1(34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
- Oleshko V.S. *Patent RU 2488093 C1*, 20.07.2013.