

УДК 669.295

*Н.А. Ночовная¹, Я.Ю. Никитин¹, В.Б. Григоренко¹, И.А. Козлов¹***ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20 ПРИ ХИМИЧЕСКОМ УДАЛЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-5-5

Впервые исследовано влияние зарубежных и отечественных химических технологий удаления эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений на комплекс свойств поверхности жаропрочного титанового сплава VT20. Визуально, гравиметрическим методом, а также с использованием растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа оценена эффективность очистки образцов от углеродсодержащих загрязнений. Определено изменение шероховатости, микротвердости и активности поверхности очищенных образцов.

Установлено, что при очистке образцов от углеродсодержащих загрязнений химическим способом может происходить увеличение микротвердости и снижение активности поверхности по сравнению с исходными образцами.

По технологическим характеристикам припоя ВПр16 оценена возможность проведения восстановительного ремонта методом пайки после удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности титанового сплава VT20 химическим способом.

Ключевые слова: химическая очистка, эксплуатационные загрязнения, углеродсодержащие загрязнения, свойства поверхности, титановый сплав.

For the first time investigated the influence of foreign and domestic chemical technologies removal of operational carbon pollution on the complex properties of the surface of the heat-resistant titanium alloy VT20. Visually, the gravimetric method, and using scanning electron microscopy and X-ray microanalysis of samples evaluated cleaning performance against carbon pollution. The change in surface roughness, microhardness and surface activity of purified samples.

It is established that when cleaning samples from carbon pollution chemically, an increase in the microhardness and a reduction in surface activity may occur, as compared to those for the initial samples.

By its technological characteristics VPr16 solder picked possibility of reconditioning by soldering after the removal of carbon pollution from the surface of titanium alloy VT20 chemical means.

Keywords: chemical cleaning, operational pollution, carbon pollution, surface properties, titanium alloy.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В современном авиационном двигателе доля титановых сплавов составляет >30%. Сплавы этого класса широко применяются для изготовления дисков, лопаток ротора и статора компрессора низкого и высокого давления (КНД и КВД), а также лопаток турбины низкого давления (ТНД) газотурбинного двигателя (ГТД). Столь широкое применение сплавов на основе титана в первую очередь связано с сочетанием таких факторов, как высокий комплекс механических свойств (в том числе при повышенных температурах), низкая плотность, высокая коррозионная стойкость [1–4].

Необходимо отметить, что одним из четырех базовых принципов создания материалов нового поколения и сложных технических систем является реализация полного жизненного цикла материала (создание–эксплуатация–диагностика, ремонт, продление ресурса–утилизация) [5–9]. Подобный подход к созданию материалов предусматривает не только наличие априори высоких эксплуатационных характеристик, но и ремонтоспособность деталей, выполненных из этих материалов.

В процессе эксплуатации на деталях проточной части компрессора ГТД, в том числе и на деталях из титановых сплавов, образуются загрязнения, которые могут заметно ухудшать параметры работы двигателя – увеличивать расход топлива, снижать коэффициент полезного действия [10, 11].

Многие специалисты в России [12–14] и за рубежом [15–17] занимаются вопросами восстановления характеристик двигателя путем удаления загрязнений с деталей проточной части компрессора как в процессе эксплуатации, так и при плановом ремонте двигателя. При этом недостаточное внимание уделено изучению изменений физико-химических свойств поверхности материала, очистка которого производится. В зависимости от способа удаления углеродсодержащих загрязнений могут наблюдаться различные виды повреждения поверхности очищаемого материала, такие как эрозия, травление и чрезмерный наклеп. Таким образом, улучшение показателей работы двигателя может привести к уменьшению ресурса его деталей и узлов, что является недопустимым.

Цель данной работы – изучить изменение свойств поверхности и оценить эффективность очистки образцов жаропрочного титанового сплава BT20 при химическом удалении эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран жаропрочный титановый псевдо- α -сплав BT20, который применяется для изготовления лопаток, дисков, корпусов и других деталей КНД и КВД. Из листового полуфабриката данного сплава толщиной 2,5 мм изготовили образцы для исследований размером 30×50 мм. На часть образцов по технологии, разработанной во ФГУП «ВИАМ», нанесли углеродсодержащие загрязнения, имитирующие эксплуатационные.

В качестве средств очистки от углеродсодержащих загрязнений исследованы восемь зарубежных и отечественных химических технологий (составов): очищающий раствор I на водной основе по ПИ1.2.118–79 (РФ), двухстадийная технология (РФ) очистки в щелочном и кислотном растворах (рыхление+травление), моющий раствор на водной основе TSP-3030 (РФ), моющий раствор на основе растворителя TSP-5050 (РФ), очиститель на водной основе ZOK-27 (США, Великобритания), очиститель на водной основе See Bee EPC-1 (США, Великобритания), кислотный очиститель AP 954 (Канада) и щелочной очиститель HDL-202 (Канада).

Образцы с нанесенными загрязнениями обрабатывали медом погружения. Концентрацию растворов и режим обработки выбирали в соответствии с рекомендациями производителя раствора. После обработки образцы промывали в горячей и холодной воде, в том числе с использованием ультразвуковой установки.

Металлографические исследования и рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) проводили на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6490 с приставкой INCA x-sight.

Планарную съемку поверхности образцов и измерение параметров шероховатости (R_a и R_z) по ГОСТ 2789–73 проводили методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ) на 3D-оптическом профилометре Plu Neox Sensofar-Tech с

увеличением $\times(10-150)$ – площадь кадра при увеличении $\times 10$ составляла $1,206 \text{ мм}^2$, разрешение по оси z соответствовало $0,1 \text{ нм}$.

Микротвердость поверхности определяли по методу Виккерса на приборе Emcotest Durascan путем определения величины площади отпечатка внедряемого индентора при заданной и постоянной нагрузке $0,981 \text{ Н}$, приложенной в течение 15 с . В качестве индентора применяли четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136 град .

Активность поверхности определяли по контактной разности потенциалов с помощью прибора «Поверхность».

Для оценки возможности проведения восстановительного ремонта методом пайки в соответствии с ГОСТ 23904–79 после очистки поверхности от загрязнений исследовали смачивание поверхности титанового сплава ВТ20 припоем ВПр16. Проведена оценка краевого угла смачивания и площади растекания припоя на поверхности.

Результаты исследования

Результаты визуального осмотра (рис. 1) и удельного изменения массы свидетельствуют о том, что обработка в очищающем растворе *1* (по ПИ1.2.118–79) позволяет полностью удалить загрязнения с титанового сплава ВТ20 без заметных повреждений поверхности.

Обработка образцов по двухстадийной технологии (рыхление+травление) позволяет полностью удалить загрязнения, но при этом зафиксирована убыль массы основного металла ($0,14 \text{ г/м}^2$). Визуально повреждения поверхности (растравы) не обнаружены.

Растворы TSP-5050, TSP-3030, ZOK-27, See Bee EPC-1 и AP 954 практически не оказывают воздействия на основной материал, однако экспериментальные данные показывают, что ни один из указанных растворов не обеспечивает полного очищения поверхности от углеродсодержащих загрязнений (рис. 1, *г*).

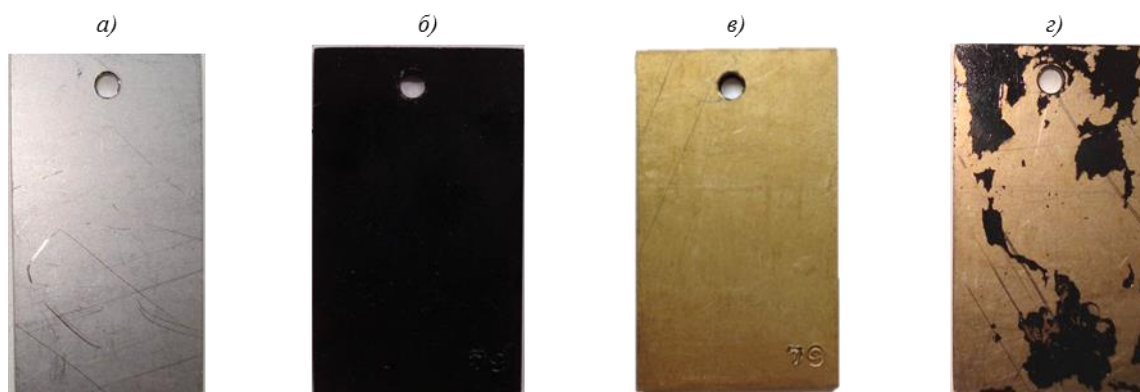


Рис. 1. Внешний вид образцов из титанового сплава ВТ20:

а – исходный (без обработки); *б* – с углеродсодержащими загрязнениями; *в* – после удаления загрязнений очищающим раствором *1* (по ПИ1.2.118–79); *г* – после удаления загрязнений раствором AP 954

При использовании раствора HDL-202 поверхность полностью очищается от загрязнений, но при этом происходит небольшое общее травление поверхности, что подтверждается данными визуального контроля (поверхность становится более матовой) и данными по убыли массы ($0,17 \text{ г/м}^2$).

По результатам предварительных исследований можно констатировать, что наилучшей очищающей способностью обладают очищающий раствор *1*, двухстадийная технология (рыхление+травление) и раствор HDL-202. В связи с этим для дальнейших

исследований целесообразно отобрать образцы, очищенные от загрязнений с использованием данных растворов.

При металлографическом анализе поверхности образцов после обработки очищающим раствором 1 (по ПИ1.2.118–79) повреждения поверхности (растворы) не наблюдаются, остатки загрязнений отсутствуют. В спектрограммах, полученных с типичных участков поверхности образцов после обработки очищающим раствором 1, отсутствуют такие элементы, как углерод, кислород и сера, свидетельствующие о наличии углеродсодержащих загрязнений, и присутствуют только элементы, входящие в химический состав сплава (рис. 2). Аналогичные результаты получены и при очистке образцов по двухстадийной технологии – растворы поверхности не наблюдаются. Обработка в растворе HDL-202 обеспечивает полную очистку поверхности. Металлографические исследования и РСМА подтверждают отсутствие остатков загрязнений на поверхности. Однако следует отметить, что в отличие от удаления загрязнений в очищающем растворе 1 и по двухстадийной технологии, макроструктура поверхности после удаления загрязнений в растворе HDL-202 несколько отличается от макроструктуры поверхности исходного образца, что свидетельствует о воздействии очищающего раствора на основной материал и легком травлении поверхности (рис. 3).

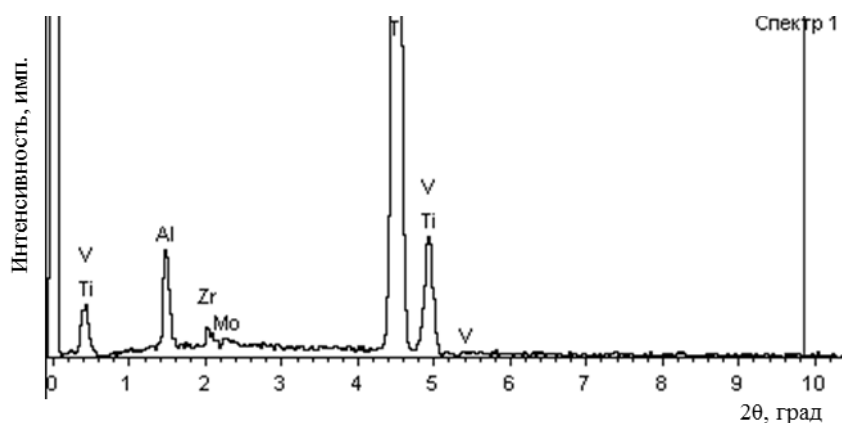


Рис. 2. Спектрограмма, полученная при РСМА с типичного участка образца из титанового сплава BT20 после удаления загрязнений очищающим раствором 1 (по ПИ1.2.118)

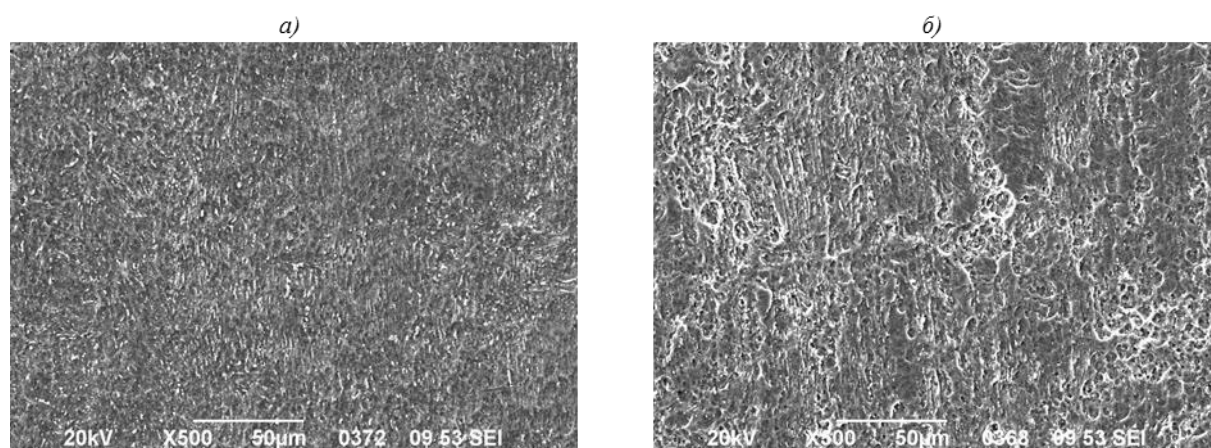


Рис. 3. Макроструктура ($\times 500$) поверхности образца из титанового сплава BT20 в исходном состоянии (без обработки) (а) и после удаления загрязнений раствором HDL-202 (б)

Значения шероховатости поверхности (R_a и R_z) титанового сплава BT20 после удаления загрязнений изменяются незначительно (табл. 1). Рельеф и профили

очищенных поверхностей имеют вид, схожий с поверхностью исходных образцов. На рис. 4 приведено 3D-изображение рельефа поверхности после удаления загрязнений.

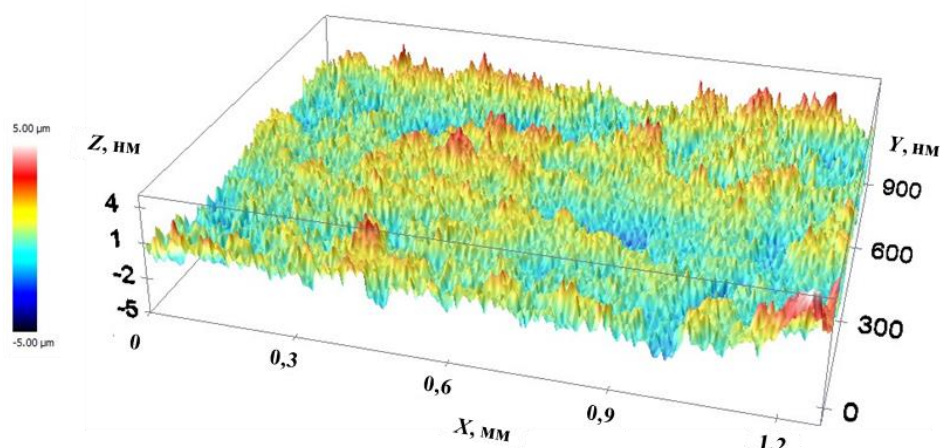


Рис. 4. 3D-изображение типичного участка поверхности образца из титанового сплава BT20 после удаления загрязнений очищающим раствором 1 (по ПИ1.2.118)

Таким образом, установлено, что при удалении углеродсодержащих загрязнений раствором HDL-202 происходит небольшое травление поверхности равномерно по всей длине образца.

Таблица 1

Значения шероховатости поверхности титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений различными растворами

Вид обработки	R_a , мкм	R_z , мкм
Очищающий раствор 1	0,50–0,80	6,3–10
Рыхление+травление	0,63–0,80	8–10
Раствор HDL-202	0,63–0,80	8–10
Без обработки (в исходном состоянии)	0,63–0,80	6,3–10

Данные по изменению микротвердости поверхности после удаления загрязнений приведены в табл. 2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что значения микротвердости образцов, очищенных с использованием раствора 1 (по ПИ1.2.118–79), двухстадийной технологии (рыхление+травление) и раствора HDL-202, несколько превышают исходные значения, что, возможно, связано с локальным газонасыщением тонких поверхностных слоев.

Таблица 2

Значения шероховатости поверхности титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений различными растворами

Вид обработки	HV*
Очищающий раствор 1	<u>374–446</u> 404
Рыхление+травление	<u>372–408</u> 386
Раствор HDL-202	<u>380–426</u> 400
Без обработки (в исходном состоянии)	<u>376–397</u> 386

* В числителе приведены минимальные и максимальные значения микротвердости, в знаменателе – средние.

В процессе ремонта ГТД (ГТУ) после удаления эксплуатационных загрязнений, как правило, на детали могут наноситься защитные покрытия или производиться пайка

с целью восстановления геометрической формы детали. С этой точки зрения очень важно обеспечить отсутствие загрязнений и активность очищенной поверхности для получения максимальной адгезии покрытий. Мерой активности поверхности может служить контактная разность потенциалов.

Так, при очистке образцов из титанового сплава VT20 от углеродсодержащих загрязнений независимо от используемого раствора происходит снижение активности поверхности (табл. 3). Показано, что при обработке очищающим раствором 1 (по ПИ1.2.118–79) снижение потенциала поверхности составляет ~24%, при использовании раствора HDL-202 и двухстадийной технологии (рыхление+травление) снижение происходит приблизительно на 54 и 47% соответственно.

При проведении пайки деталей важными технологическими характеристиками являются краевой угол смачивания и площадь растекания припоя. После удаления загрязнений определяли указанные характеристики для припоя ВПр16 (табл. 4). Полученные данные показывают, что указанные технологии очистки обеспечивают приблизительно одинаковые значения по смачиванию и растеканию припоя ВПр16 и находятся на уровне, характерном для поверхности исходных образцов.

Таблица 3

Значения поверхностного потенциала образцов из титанового сплава VT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений различными растворами

Вид обработки	Потенциал поверхности*, эВ
Очищающий раствор 1	$\frac{0,18-0,28}{0,23}$
Рыхление+травление	$\frac{0,12-0,20}{0,16}$
Раствор HDL-202	$\frac{0,11-0,23}{0,14}$
Без обработки (в исходном состоянии)	$\frac{0,28-0,34}{0,30}$

* В числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Таблица 4

Технологические характеристики припоя ВПр16 после удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности титанового сплава VT20 различными растворами

Вид обработки	Площадь растекания, мм ²	Краевой угол смачивания, град
Очищающий раствор 1	81–87	10–11
Рыхление+травление	78–84	10–11
Раствор HDL-202	80–81	10–11
Без обработки (в исходном состоянии)	81–83	10–11

Обсуждение и заключения

В работе установлено, что наиболее эффективное удаление углеродсодержащих загрязнений с поверхности жаропрочного титанового сплава VT20 обеспечивают отечественный очищающий раствор 1 (по ПИ1.2.118–79), двухстадийная технология очистки в щелочном и кислотном растворах (рыхление+травление) и зарубежный раствор HDL-202.

Однако при удалении углеродсодержащих загрязнений с применением раствора HDL-202 может происходить общее травление поверхности и изменение ее макроструктуры.

Газонасыщение тонких поверхностных слоев может быть как следствием процессов образования загрязнений, которые содержат большое количество углерода, так и процессов химической очистки поверхности, при которых возможно образование водорода.

При нанесении покрытий в процессе ремонта деталей из титановых сплавов следует рекомендовать очищающий раствор 1, который, эффективно удаляя загрязнения, обеспечивает активность поверхности на уровне 76% от исходного состояния.

Отсутствие ухудшения характеристик смачивания припоем ВПр16 поверхности, очищенной от углеродсодержащих загрязнений с использованием очищающего раствора 1 (по ПИ1.2.118–79) и двухстадийной технологии (рыхление+травление), свидетельствует о беспрепятственной возможности проведения восстановительного ремонта методом пайки.

В виду того, что указанные средства очистки могут приводить к увеличению микротвердости поверхности, для окончательной рекомендации растворов для удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности деталей из титановых сплавов целесообразно провести механические испытания очищенных образцов на кратковременную прочность и циклическую долговечность с установлением характера разрушения.

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») [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.09.2017).
2. Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Исследование структуры и химического состава слитков опытного высоколегированного титанового сплава // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.09.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-6-6.
3. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Панин П.В., Новак А.В. Технологическая пластичность, структура и фазовый состав опытного титанового орто-сплава, содержащего 13% (по массе) алюминия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №12. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.09.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-8-8.
4. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А. Опыт ВИАМ в области разработки и исследования экономнолегированных титановых сплавов нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №9. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.09.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5.
5. 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.
6. Каблов Е.Н. Материалы как основа безопасности // Индустрия. 2014. №16. С. 1–2.
7. Каблов Е.Н. Чтобы собрать самолет по атомам // Индустрия. Инженерная газета. 2015. №12. С. 1–2.
8. 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. С. 23–32.
9. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
10. Huadong Y., Hong X. The Effect of Surface Roughness on Thermodynamic Performance Parameter of Axial Flow Compressor // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. No. 5 (18). P. 4458–4463.

11. Степанков И.А. Комплексное решение для очистки компрессоров ГТУ: очиститель Turbo-K и антифриз AF10 // Турбины и дизели. 2015. №1. С. 54–55. URL: http://www.turbine_diesel.ru (дата обращения: 01.09.2017).
12. Мальцев Е.Н. Разработка обобщенного метода расчета и проектирования системы влажной очистки проточной части ГТД и средств ее реализации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2013. 20 с.
13. Доценко Г.Н. Разработка принципов очистки деталей авиационной техники от нагароподобных загрязнений биотехнологическим методом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. 37 с.
14. Шулов В.А., Быщенко О.А., Теряев Д.А. и др. Разработка технологического процесса восстановления свойств лопаток компрессора ГТД из жаропрочной стали ЭП866-Ш с применением сильнооточных импульсных электронных пучков // Взаимодействие излучений с твердым телом: матер. 8-й Междунар. конф. Минск, 2009. С. 360–362.
15. Enyia J.D., Li Y., Thank-God I., Igbong D.I. Industrial Gas Turbine On-line Compressor Washing for Power Generation. // *Isaiah International Journal of Engineering Research and Technology*. 2015. Vol. 4. Issue 08. P. 500–506.
16. Kurz R., Brun K., Mokhatab S. Gas turbine compressor blade fouling mechanisms // *Pipeline & Gas Journal*. 2011. Vol. 238. No. 9 . P. 18–21.
17. Maiwada B., Muaz N.I., Ibrahim S., Musa S.M. Impacts of Compressor Fouling On the Performance of Gas Turbine // *International Journal of Engineering Science and Computing*. 2016. Vol. 6. Issue 3. P. 2118–2125.