

ОЦЕНКА СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20 ПОСЛЕ УДАЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю.*, Гудков С.В., 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*

Исследовано влияние зарубежных и отечественных химических способов удаления углеродсодержащих загрязнений на комплекс свойств жаропрочного титанового сплава VT20. Оценена эффективность очистки образцов от углеродсодержащих загрязнений визуальным, гравиметрическим методами, а также с использованием растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Определено изменение шероховатости, микротвердости, активности поверхности и механических свойств очищенных образцов. Оценена возможность применения припоя ВПр16 для проведения восстановительного ремонта деталей газотурбинного двигателя (ГТД) методом пайки при удалении углеродсодержащих загрязнений химическим способом.

При очистке образцов от углеродсодержащих загрязнений исследуемыми растворами наблюдается некоторое увеличение микротвердости и снижение активности поверхности по сравнению с исходными образцами. Снижение механических свойств образцов, очищенных от загрязнений, не зафиксировано.

Ключевые слова: углеродсодержащие загрязнения, шероховатость, активность, микротвердость, прочность, пластичность, пайка, жаропрочный титановый сплав.

Введение

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) [1–4].

Проведенный в [5] анализ исследований показывает, что вопрос ремонта, в том числе очистки в заводских условиях деталей проточной части компрессора ГТД от углеродсодержащих загрязнений, проработан недостаточно. В настоящее время для изготовления различных деталей и сборочных единиц компрессора широко используются титановые сплавы [6–9]. Для этих сплавов отсутствуют данные по влиянию различных технологий и способов очистки загрязнений на механические свойства при статическом и динамическом нагружении, а также на свойства поверхности (например, микротвердость). К тому же отсутствуют и экспериментальные данные по оценке эффективности очистки деталей и узлов при применении той или иной

технологии удаления углеродсодержащих загрязнений. В [10–16] для подтверждения качества очистки поверхности материала приводятся общие данные без приведения результатов тонких методов исследования, что не во всех случаях может считаться корректным.

В реальных условиях перечисленные обстоятельства затрудняют технологом выбор наиболее эффективных и безопасных способов очистки деталей и узлов компрессора ГТД, изготовленных из титановых сплавов.

В связи с тем, что большинство заводов и ремонтных предприятий имеют необходимое оборудование для химической обработки деталей, рационально направить исследования на поиск химического состава и/или технологии очистки титановых сплавов, которая позволила бы производить 100%-ную высокоэффективную очистку поверхности без ее повреждения (растратов) и снижения основных свойств очищаемого материала с обеспечением дальнейшей ремонтпригодности деталей.

Цель данной работы — оценка изменения свойств титанового сплава ВТ20 при удалении углеродсодержащих загрязнений химическим способом.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран жаропрочный титановый псевдо α -сплав ВТ20. Из листового полуфабриката данного сплава для исследований были изготовлены лабораторные образцы.

На часть образцов по технологии, разработанной ФГУП «ВИАМ», были нанесены углеродсодержащие загрязнения, имитирующие эксплуатационные.

В качестве средств очистки от углеродсодержащих загрязнений были исследованы восемь зарубежных и отечественных химических технологий (составов): очищающий раствор на водной основе по ПИ 1.2.118 (РФ), двухстадийная технология очистки в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление») (РФ), 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 методом 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 рентгено-спектральный микроанализ (РСМА) проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6490 с приставкой INCA x-sight.

Планарная съемка поверхности образцов и измерение параметров шероховатости (R_a и R_z) по ГОСТ 2789-73 велись методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии на 3D-оптическом профилометре Plu Neox Sensofar-Tech с увеличением $\times 10$ -150 (площадь кадра при $\times 10$ — 1,206 мм², разрешение по оси z — 0,1 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 Н в течение 15 с. В качестве индентора применялась четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине, равным 136°.

Механические испытания на растяжение проводили на электромеханической машине Walter+Bai LFM-50 по ГОСТ 1497-84 при комнатной температуре и по ГОСТ 9651-84 — при повышенной температуре.

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

Для оценки возможности проведения восстановительного ремонта методами пайки после очистки поверхности от загрязнений исследовали смачивание поверхности титанового сплава ВТ20 припоем ВПр16 в соответствии с ГОСТ 23904-79.

Результаты исследования

Экспериментальные данные показывают, что растворы TSP-5050, TSP-3030, ZOK-27, See Bee EPC-1 и AP 954 не обеспечивают полного очищения поверхности от углеродсодержащих загрязнений, в то время как обработка в очищающем растворе №1 (по ПИ 1.2.118), растворе HDL-202 и с использованием двухстадийной технологии «рыхление + травление» позволяет полностью удалить загрязнения с поверхности титанового сплава ВТ20. Однако при использовании двухстадийной технологии «рыхление + травление» и раствора HDL-202 наблюдается убыль массы основного металла (0,14 г/м² и 0,17 г/м² соответственно).

При металлографическом анализе поверхности образцов после обработки очищающим раствором №1 (по ПИ 1.2.118) повреждений поверхности (растравы) не наблюдается, остатки загрязнений отсутствуют. В спектрограммах, полученных с типичных участков поверхности образцов, отсутствуют такие элементы, как углерод, кислород и сера, свидетельствующие о наличии углеродсодержащих загрязнений, и присутствуют только элементы, входящие в химический состав сплава. Аналогичные результаты получены и при очистке образцов по двухстадийной технологии — растравы поверхности не наблюдаются. Обработка в растворе HDL 202 обеспечивает полную очистку поверхности. Данные РЭМ и РСМА подтверждают отсутствие остатков загрязнений на поверхности. Однако стоит отметить, что в отличие от обработки в очищающем растворе №1 и по двухстадийной технологии, макро-структура поверхности после удаления загрязнений в растворе HDL 202 несколько отличается от макро-структуры поверхности исходного образца, что свидетельствует о воздействии очищающего раствора на основной материал и легком травлении поверхности (рис. 1).

Значения шероховатости поверхности (R_a , R_z) титанового сплава ВТ20 после удаления загрязне-

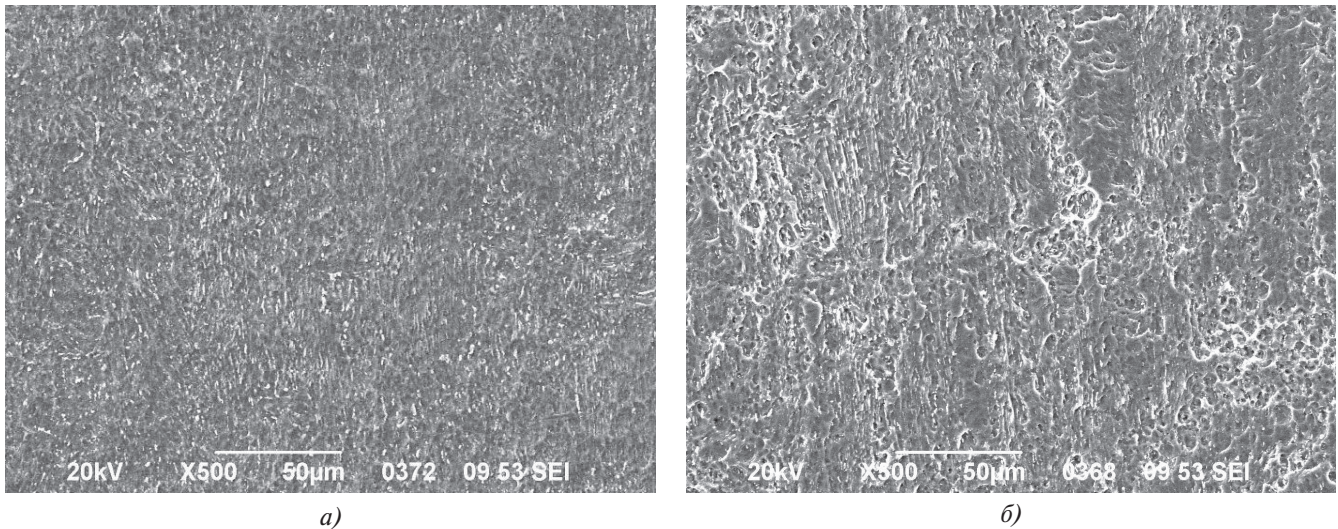


Рис. 1. Макроструктура поверхности титанового сплава BT20: а — исходный образец (без обработки), x500; б — образец после удаления загрязнений раствором HDL 202, x500

ний изменяются незначительно (табл. 1). Рельеф и профили очищенных поверхностей имеют вид, схожий с поверхностью исходных образцов. Пример 3D-изображения рельефа поверхности после удаления загрязнений приведен на рис. 2.

Таблица 1

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

Вид раствора	Ra, мкм	Rz, 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 (исходное состояние)	0,63—0,80	6,3—10

Данные по изменению микротвердости поверхности после удаления загрязнений приведены в табл. 2. Полученные результаты показывают, что значения микротвердости образцов, очищенных с использованием раствора №1 (по ПИ 1.2.118) и раствора HDL 202, несколько превышают таковые для исходных образцов.

В процессе ремонта ГТД после удаления эксплуатационных загрязнений, как правило, на детали могут наноситься защитные покрытия или производится пайка с целью восстановления геометрии детали. С точки зрения нанесения покрытий очень важно обеспечить отсутствие загрязнений и активность очищенной поверхности для получения максимальной адгезии покрытий. Мерой активности поверхности может служить контактная разность потенциалов.

Таблица 2

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

Вид раствора	HV
Очищающий раствор №1	$\frac{374 \div 446^*}{404}$
«Рыхление + травление»	$\frac{372 \div 408}{386}$
Раствор HDL 202	$\frac{380 \div 426}{400}$
Без обработки (исходное состояние)	$\frac{376 \div 397}{386}$

* Примечание: в числителе дроби приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе — среднее.

Так, при очистке образцов из титанового сплава BT20 от углеродсодержащих загрязнений независимо от используемого раствора происходит снижение активности поверхности (табл. 3). При обработке очищающим раствором №1 по ПИ 1.2.118 снижение потенциала поверхности составляет ~24%, при использовании раствора HDL 202 и технологии «рыхление + травление» снижение происходит примерно на 54 и 47% соответственно.

При проведении процессов пайки деталей важными технологическими характеристиками являются краевой угол смачивания и площадь растекания припоев. После удаления загрязнений были определены указанные характеристики для припоя ВПр16 (табл. 4). Полученные данные показывают, что все указанные технологии очистки обеспечива-

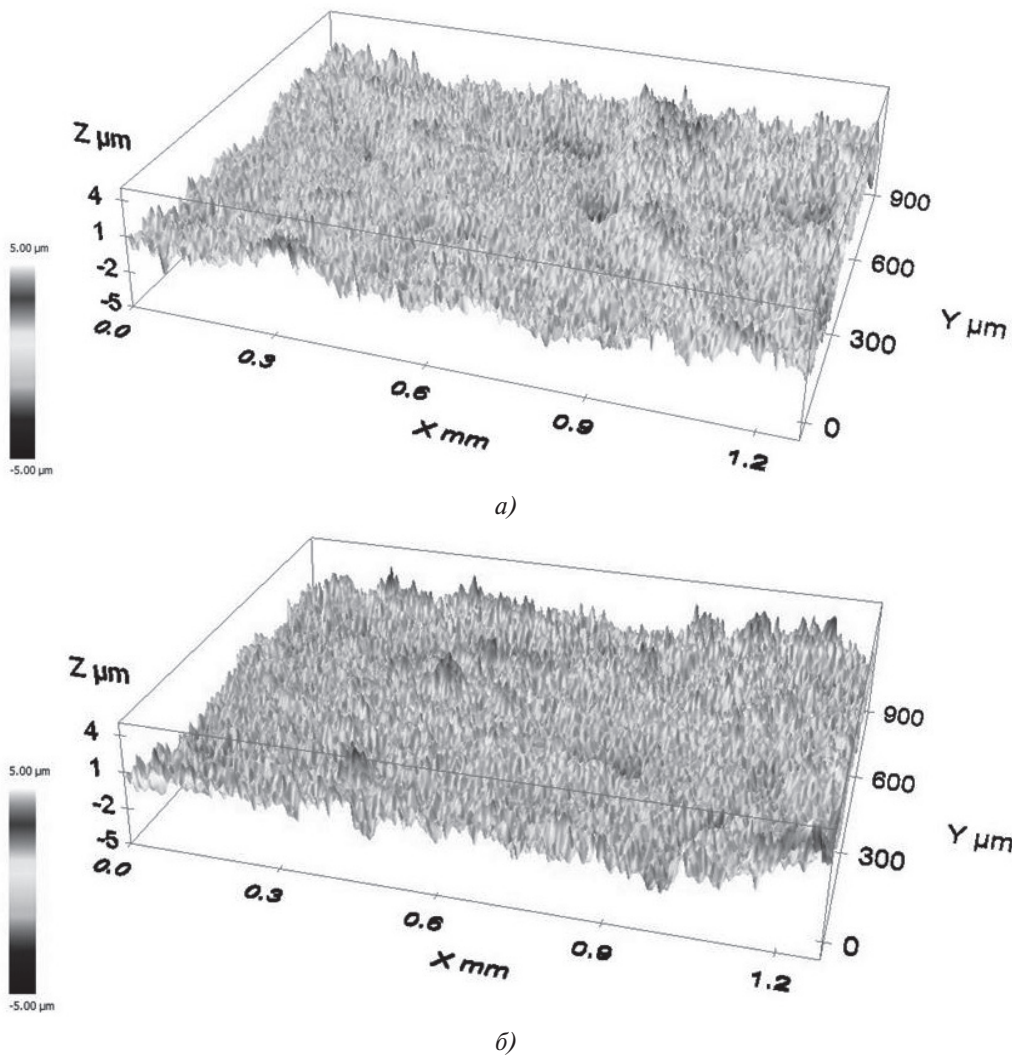


Рис. 2. 3D-изображение типичного участка поверхности образца титанового сплава BT20: а — без обработки (в исходном состоянии); б — после удаления загрязнений очищающим раствором №1 (по ПИ 1.2.118)

Таблица 3

Значения поверхностного потенциала образцов титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений различными растворами

Вид раствора	Потенциал поверхности, эВ
Очищающий раствор №1	$\frac{0,18 \div 0,28^*}{0,23}$
«Рыхление + травление»	$\frac{0,12 \div 0,20}{0,16}$
Раствор HDL 202	$\frac{0,11 \div 0,23}{0,14}$
Без обработки (исходное состояние)	$\frac{0,28 \div 0,34}{0,30}$

Таблица 4

Технологические характеристики припоя ВПр16 после удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности титанового сплава BT20 различными растворами

Вид раствора	Площадь растекания, мм ²	Краевой угол смачивания, °
Очищающий раствор №1	81-87	10-11
«Рыхление + травление»	78-84	10-11
Раствор HDL 202	80-81	10-11
Без обработки (исходное состояние)	81-83	10-11

* Примечание: в числителе дроби приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе — среднее.

ют примерно одинаковые значения по смачиванию и растеканию припоя ВПр16 и находятся на уровне, характерном для поверхности исходных образцов.

С целью исследования влияния процессов образования и удаления загрязнений на прочность и пластичность титанового сплава ВТ20 были проведены механические испытания на растяжение при комнатной (табл. 5) и рабочей температуре данного сплава (табл. 6). Полученные данные свидетельствуют о том, что как на образцах с загрязнениями, так и на очищенных образцах, вне зависимости от применяемого раствора, не наблюдаются значительные изменения предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения. Все полученные значения находятся в пределах паспортных характеристик сплава.

Различия в микростроении изломов исходных (образцов без обработки), изломов образцов с загрязнениями и образцов, очищенных от загрязнений с использованием очищающего раствора №1, двухстадийной технологии «рыхление + травление», и раствора HDL 202 не выявлены. При малых увеличениях на изломах наблюдается структурно-зависимый характер разрушения (рис. 3). Поверхность разрушения представлена пластичным мелкоячеистым рельефом, характерным для данного материала.

Выводы

Наиболее эффективное удаление углеродсодержащих загрязнений с поверхности жаропрочного титанового сплава ВТ20 обеспечивают: отечественный очищающий раствор №1 (по ПИ 1.2.118), двухстадийная технология очистки в щелочном и кис-

Таблица 5

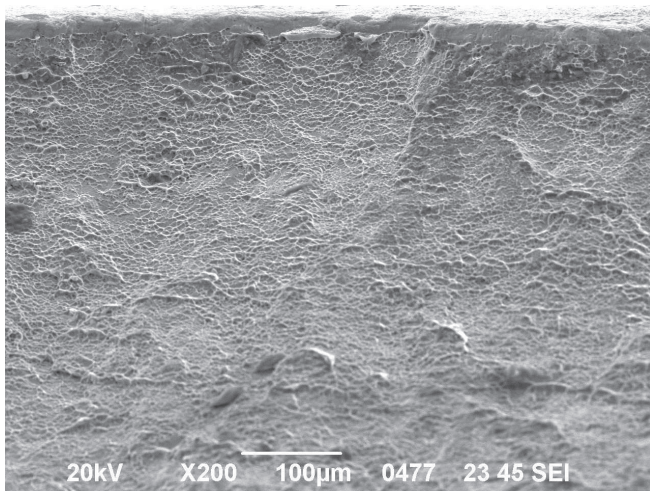
Результаты испытаний титанового сплава ВТ20 на растяжение при температуре 20 °С после удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности различными растворами

Вид раствора	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Очищающий раствор №1	1070	880	11
«Рыхление +травление»	1080	870	10
Раствор HDL 202	1070	870	10,5
С загрязнениями	1070	860	10
Без обработки (исходное состояние)	1070	870	11,5
По паспорту	≥ 930	≥ 830	≥ 7

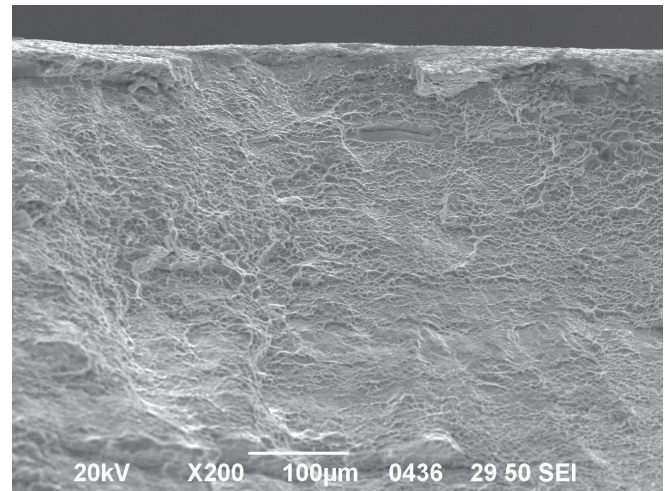
Таблица 6

Результаты испытаний титанового сплава ВТ20 на растяжение при температуре 450 °С после удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности различными растворами

Вид раствора	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Очищающий раствор №1	790	590	8
«Рыхление +травление»	790	590	8
Раствор HDL 202	790	620	8
С загрязнениями	790	600	8
Без обработки (исходное состояние)	790	620	8
По паспорту	≥ 590	≥ 540	≥ 6



а)



б)

Рис. 3. Вид поверхности излома после испытаний на растяжение при комнатной температуре образца: а — без обработки (исходное состояние), х200; б — очищенного от загрязнений раствором HDL 202, х200

лотном растворе («рыхление + травление») и зарубежный раствор HDL 202.

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

Незначительное увеличение микротвердости очищенных образцов (до 5%) может быть связано с газонасыщением тонких поверхностных слоев вследствие как образования углеродсодержащих загрязнений, так и процессов химической очистки поверхности.

При нанесении покрытий в процессе ремонта для деталей из титановых сплавов следует рекомендовать очищающий раствор №1, который, эффективно удаляя загрязнения, обеспечивает активность поверхности на уровне 76 % от исходного состояния.

Удаление углеродсодержащих загрязнений с поверхности титанового сплава BT20 раствором №1 (по ПИ 1.2.118), по двухстадийной технологии «рыхление + травление» и раствором HDL 202 не влияет на технологические характеристики припоя ВПр16, ввиду чего очищенные детали могут беспрепятственно восстанавливаться методом пайки.

Очистка углеродсодержащих загрязнений всеми исследуемыми растворами не приводит к снижению прочностных, пластических характеристик сплава BT20 и изменению характера его разрушения в условиях статического нагружения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.9 «Припой 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») [17].

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. *Материалы как основа безопасности* // Индустрия. Инженерная газета. 2014. №16.
2. Каблов Е.Н. *Чтобы собрать самолет по атомам* // Индустрия. Инженерная газета. 2015. №12.
3. 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.
4. Каблов Е.Н. *Тенденции и ориентиры инновационного развития России: Сб. науч.-информ. материалов. — 3-е изд. — М.: ВИАМ, 2015. — 720 с.*
5. 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). URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1078.pdf> (дата обращения: 21.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5.
6. Антипов В.В. *Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов* // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157-167.
7. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. *Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана* // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 196-206.
8. 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. 2016. № 9(45). URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1005.pdf> (дата обращения: 03.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5.
9. Колесников А.В., Колесник А.В., Заболотский А.П. *Пневмотермическая формовка трехслойных клиновидных панелей из титанового сплава BT20* // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 155-161.
10. Леонтьев В.А., Зиличихис С.Д., Кондратюк Э.В., Замковой В.Е. *Восстановление работоспособности ГТД с применением новых технологий и материалов* // Вестник двигателестроения. 2006. № 4. С. 99-103.
11. *Установки для струйной очистки. Сделано в России.* // АО «Сервис Промышленных Энергетических и Нефтегазовых Систем» (СПЭНС). URL: <http://www.agd-russia.ru> (дата обращения: 14.04.2017)
12. Планковский С.И., Головин И.И., Сиренко Ф.Ф. *Анализ существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях* // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 6(103). С. 8-14.
13. *Очистка сухим льдом* // ООО «Керхер». URL: <https://www.karcher.ru/ru/professional/ochistka-sukhim-ldom.html> (дата обращения: 10.04.2017).
14. Волков Д.И., Толкачёв А.В. *Снятие нагара с направляющих аппаратов газотурбинного двигателя с использованием виброабразивной обработки* // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 1(174). С. 32-35.
15. Вейко В.П., Кишалов А.А., Мути Т.Ю. и др. *Перспективы индустриальных применений лазерной очистки материалов* // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3(79). С. 50-54.
16. Михайлов Д.А., Недашковский А.П., Ивченко Т.Г. *Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий* // Прогрессив-

ные технологии и системы машиностроения. 2014. № 1(47). С. 213-224.

17. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ 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.

VT20 TITANIUM ALLOY PROPERTIES' ESTIMATION AFTER REMOVING OF OPERATIONAL CARBONACEOUS IMPURITIES BY CHEMICAL MEANS

Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu.* , Gudkov S.V., 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

The lack of information in domestic and foreign sources on the effect of carbonaceous impurities purification technology on titanium alloys' properties complicates for technologists selection of the most effective and safe methods of purification of a gas turbine engine compressor air-gas channel parts and units.

The purpose of this work consists in evaluating the property change of VT20 titanium alloy while removing carbonaceous impurities by chemical means.

The studies were performed with laboratory samples manufactured from a VT20 alloy sheet-billet. Carbonaceous impurities, imitating operational ones, were applied on a number of samples according to the developed technology.

Eight foreign made and domestic chemical technologies (compositions) were studied as purification means.

The authors established that the most effective removal of the carbonaceous impurities from the surface of the heat-proof VT20 titanium alloy was ensured by domestic purifying solution No 1, a two-stage purification technology in alkaline and acid solutions ("loosening + etching"), and foreign made solution HDL 202. However, while purifying carbonaceous impurities with HDL 202 solution a general etching of the surface and its microstructure change might occur.

The surface roughness values of the VT20 titanium alloy do not change significantly after the removal of impurities. The relief and profiles of the purified surfaces have a shape similar to those of the original samples.

A slight increase in the microhardness of the purified samples (up to 5%) can occur due to gas saturation of thin surface layers, due to both formation of carbonaceous impurities and the processes of chemical surface purifying.

When purifying the surface from carbonaceous impurities, the activity of the surface decreases, regardless of the type of the solution used. The least decrease in activity is ensured by cleaning solution No 1.

There is no deterioration of moistening characteristics by the VPr16 solder of the surface purified from the carbonaceous impurities by purifying solution No 1 or two-stage "loosening + etching" technology and HDL 202 solution.

Purification of carbonaceous impurities by all studied solutions does not lead to VT20 alloy strength and plastic characteristics degradation, and to a change in the character of its destruction under conditions of static loading.

Keywords: carbonaceous impurities, roughness, surface activity, microhardness, strength, ductility, soldering, heat-proof titanium alloy.

References

1. Kablov E.N. *Industriya. Inzhenernaya gazeta*, 2014, no. 16.
2. Kablov E.N. *Industriya. Inzhenernaya gazeta*, 2015, no. 12.
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. *Avtomaticheskaya svarka*, 2013, no. 10, pp. 23–32.
4. Kablov E.N. *Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiya Rossii* (Trends and reference points of innovative development of Russia), Moscow, VIAM, 2015, 720 p.
5. Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu. *Trudy VIAM*, 2017, no. 3(51), available at: works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1078.pdf
6. Antipov V.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 157-167.
7. Nochovnaya N.A., Ivanov V.I., Alekseev E.B., Kochetkov A.S. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 196–206.
8. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Kochetkov A.S., Bokov K.A. *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, available at: <http://>

- www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1005.pdf
9. Kolesnikov A.V., Kolesnik A.V., Zabolotskii A.P. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no.3, pp. 155-161.
 10. Leont'ev V.A., Zilichikhis S.D., Kondratyuk E.V., Zamkovoii V.E. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2006, no. 4, pp. 99-103.
 11. *Ustanovki dlya struinoi ochistki. Sdelano v Rossii*, [http: / /www.agd-russia.ru](http://www.agd-russia.ru)
 12. Plankovskii S.I., Golovin I.I., Sirenko F.F. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2013, no. 6(103), pp. 8-14.
 13. *Ochistka sukhim l'dom*, <https://www.karcher.ru/ru/professional/ochistka-sukhim-l-dom.html>
 14. Volkov D.I., Tolkachev A.V. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii*, 2015, no. 1(174), pp. 32-35.
 15. Veiko V.P., Kishalov A.A., Mutin T.Yu., Smirnov V.N. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2012, no. 3(79), pp. 50-54.
 16. Mikhailov D.A., Nedashkovskii A.P., Ivchenko T.G. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*, 2014, no. 1(47), pp. 213-224.
 17. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no.1 (34), pp. 3-33.