



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

---

На правах рукописи

**НИКИТИН ЯНИС ЮРЬЕВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ УДАЛЕНИЯ  
УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ФИЗИКО-  
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО  
СПЛАВА VT20**

Специальность 05.16.09 - Материаловедение (машиностроение)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Ночовная Надежда Алексеевна

Москва - 2018

## Содержание

Актуальность темы.....	4
1 Аналитический обзор литературы. Повреждения проточной части компрессора газотурбинного двигателя.....	10
1.1 Углеродсодержащие загрязнения в проточной части компрессора	14
1.1.1 Причины образования загрязнений.....	14
1.1.2 Состав и свойства загрязнений.....	17
1.1.3 Влияние загрязнений проточной части компрессора на параметры работы двигателя.....	22
1.2 Технологии очистки деталей проточной части компрессора газотурбинного двигателя от загрязнений.....	23
1.2.1 Способы очистки в процессе эксплуатации.....	23
1.2.2 Способы очистки в заводских условиях.....	31
Заключение по разделу.....	44
2 Объекты и методы исследования.....	47
2.1 Жаропрочный титановый сплав BT20.....	47
2.2 Химические технологии очистки углеродсодержащих загрязнений.....	48
2.3 Методы исследования эффективности очистки и свойств поверхности.....	53
2.4 Методы исследования механических свойств .....	59
2.5 Технология изготовления образцов.....	61
3 Исследование влияния химических технологий удаления углеродсодержащих загрязнений на свойства поверхности титанового сплава BT20.....	67
3.1 Оценка эффективности очистки поверхности.....	67
3.2 Металлографический анализ поверхности.....	75
3.3 Оценка изменения рельефа поверхности.....	81
3.4 Оценка изменения активности поверхности.....	86
3.5 Оценка изменения микротвердости поверхности.....	87

4	Исследование технологических характеристик припоя ВПр16 применительно к титановому сплаву VT20.....	88
5	Исследование изменения механических свойств титанового сплава VT20 после химического удаления углеродсодержащих загрязнений.....	89
5.1	Прочность и пластичность образцов в условиях кратковременного статического нагружения.....	89
5.2	Оценка характера разрушения образцов после испытаний на растяжение.....	90
5.3	Прочность и пластичность образцов в условиях длительного статического нагружения.....	102
6	Исследование качества очистки лопаток компрессора газотурбинного двигателя.....	106
	Выводы.....	113
	Список сокращений и условных обозначений.....	115
	Список используемых источников.....	116

### Актуальность темы

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) и газотурбинные установки (ГТУ) используются в самых разных отраслях промышленности. Условия их эксплуатации существенно влияют на эксплуатационные характеристики и надежность ГТД, приводят к необратимой потере мощности и снижению коэффициента полезного действия (КПД). Одной из причин этого является образование загрязнений на деталях проточной части компрессора ГТД или ГТУ. Даже при благоприятных условиях эксплуатации забираемый двигателем воздух содержит пыль, соли, органические примеси и т.п. В результате неудовлетворительной работы уплотнительных элементов может происходить заброс масла из подшипников. Попадая в проточную часть, частички загрязняющих примесей при высоких температурах (до 650°C) «налипают» на поверхность лопаток компрессора, со временем образуя слой углеродсодержащих загрязнений.

Для очистки от углеродсодержащих загрязнений, а также повышения характеристик ГТД/ГТУ и снижения расхода топлива в процессе эксплуатации применяют промежуточные промывки их проточной части моющими растворами, как на работающем агрегате, так и на остановленном.

Основные работы зарубежных специалистов посвящены исследованию влияния промежуточных промывок на параметры работы двигателя, моделированию процесса промывок при различных режимах работы двигателя, а также созданию специальных устройств и моющих жидкостей для промывки. Анализируя отечественные публикации, можно сказать, что вопросам восстановления характеристик двигателя в процессе эксплуатации по средствам очистки проточной части, уделяется недостаточное внимание.

Стоит отметить, что после определенного периода эксплуатации даже при самых совершенных технологиях и схемах промежуточных промывок проточной части двигателя уже не удается достичь восстановления характеристик до исходного (формулярного) уровня, что может быть связано

с различными причинами, например, неправильным подбором моющего раствора или невозможностью промыть последние, более дальние ступени компрессора. В связи с этим приходится проводить остановку двигателя, его ремонт и очистку деталей проточной части компрессора в заводских условиях.

Для изготовления деталей компрессора в настоящее время все более широко применяют титановые сплавы. Благодаря высокому комплексу механических свойств (в том числе при повышенных температурах), низкой плотности, высокой коррозионной стойкости титановые сплавы занимают одно из лидирующих мест в двигателестроении. В современном авиационном двигателе доля титановых сплавов составляет более 30%. Из титановых сплавов изготавливают диски, лопатки ротора и статора компрессора низкого давления (КНД), компрессора высокого давления (КВД), а также лопатки турбины низкого давления ГТД.

В литературе описано достаточно много способов и технологий очистки деталей от различных эксплуатационных загрязнений в заводских условиях, но при этом практически не представлено экспериментальных данных по исследованию качества (эффективности) очистки поверхности от углеродсодержащих загрязнений, данных по влиянию технологий удаления загрязнений на свойства очищаемого материала: прочность, пластичность, микротвердость, шероховатость и потенциал поверхности и другие. Большинство публикуемых по данному вопросу работ носят обзорный характер. Отсутствие такого рода информации затрудняет выбор наиболее эффективных и безопасных способов очистки деталей и узлов компрессора ГТД.

Таким образом, исследование влияния технологий очистки лопаток и других деталей проточной части ГТД из титановых сплавов от эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений на физико-механические свойства материала при заводском ремонте двигателя, а также разработка

безопасных и высокоэффективных способов очистки, является актуальной научной и практической задачей.

## **Цели и задачи**

### **Цель работы:**

Оценка влияния химических технологий удаления углеродсодержащих загрязнений на физико-механические свойства образцов титанового сплава BT20 и разработка на этой основе технологических рекомендаций по очистке поверхности деталей ГТД при ремонтно-восстановительных мероприятиях.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать эффективность очистки поверхности титанового сплава BT20 от углеродсодержащих загрязнений растворами отечественного и зарубежного производства;
2. Исследовать влияние воздействия химических растворов на структуру и свойства поверхности титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений;
3. Изучить возможность ремонта деталей ГТД из титанового сплава BT20 методом пайки после удаления углеродсодержащих загрязнений химическим способом;
4. Исследовать влияние технологий химического удаления углеродсодержащих загрязнений на механические свойства и характер разрушения титанового сплава BT20;
5. Разработать рекомендации по технологии химической очистки углеродсодержащих загрязнений с поверхности деталей ГТД из титановых сплавов.

## Научная новизна

1. Показано, что химическая очистка поверхности образцов титанового сплава BT20 приводит к снижению поверхностного потенциала. Установлено, что наименьшую степень снижения потенциала (на 24%) обеспечивает очищающий раствор на водной основе OP1. Показано, что обработка в исследуемых растворах не приводит к ухудшению смачивания поверхности припоем ВПр16.

2. Установлено, что в результате химической очистки поверхности при повышенных температурах увеличение микротвердости за счет газонасыщения поверхности продуктами химических реакций не превышает 5%. Микрорентгеноспектральным анализом не обнаружено увеличение содержания углерода, кислорода, серы и их соединений в поверхностном слое.

3. Установлено, что удаление углеродсодержащих загрязнений не приводит к ухудшению микрогеометрии поверхности образцов, что свидетельствует об отсутствии растворения в исследованных растворах основного материала.

## Практическая значимость

Разработаны рекомендации по технологии химического удаления загрязнений с поверхности деталей проточной части компрессора газотурбинных двигателей и установок, изготовленных из титанового сплава BT20, включающие обработку загрязненных деталей и узлов методом погружения в водный очищающий раствор, разработанный в ВИАМ, при температуре 50-60°C, выдержку в течение 2 часов с последующей промывкой в горячей и холодной воде с использованием ультразвуковой установки. Технология обеспечивает полную очистку от углеродсодержащих загрязнений без потери массы основного металла, изменения

макроструктуры, микрогеометрии поверхности и ухудшения физико-механических свойств, в том числе при длительном нагружении при повышенных температурах.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Влияние вида и технологических параметров раствора на значения поверхностного потенциала, шероховатости и микротвердости образцов из титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений.

2. Влияние технологий химической очистки углеродсодержащих загрязнений на изменение механических свойств титанового сплава BT20.

3. Влияние химического воздействия на изменение содержания углерода, кислорода и серы на поверхности титанового сплава BT20 при удалении углеродсодержащих загрязнений.

4. Влияние химического способа очистки титанового сплава BT20 от углеродсодержащих загрязнений на изменение характеристик смачивания поверхности припоем ВПр16.

### **Степень достоверности и апробации результатов**

Исследования проведены с использованием современного оборудования, поверенного (откалиброванного) метрологическими службами и имеющего действующие свидетельства (клейма). Стандартные испытания и исследования выполнены с соблюдением требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (государственные стандарты, стандарты организации).

О результатах научно-исследовательской работы доложено на конференции «XVII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов - молодых ученых», Екатеринбург 2016; на XLIII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские



чтения», Москва, 2017; на XLIV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 2018.

По результатам исследований опубликовано 6 работ, из них 3 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

## **1 Аналитический обзор литературы. Повреждения проточной части компрессора газотурбинного двигателя**

В процессе эксплуатации происходит неизбежное снижение основных рабочих характеристик ГТД (снижение КПД, увеличение расхода топлива, повышение температуры газов перед турбиной, снижение устойчивости работы). Одной из причин снижения рабочих характеристик ГТД является повреждение проточной части компрессора. При дефектации ГТД можно выделить следующие основные повреждения проточной части компрессора [1-6]:

- эрозия рабочих лопаток (рисунок 1.1);
- повреждения лопаток посторонними предметами (изменение формы лопаток) (рисунок 1.2);
- существенное увеличение шероховатости лопаток;
- коррозионные повреждения лопаток (стальных) (рисунок 1.3);
- загрязнения лопаток (образование нагара, солевых отложений) (рисунок 1.4).

В процессе работы ГТД потребляет огромное количество воздуха. При эксплуатации практически в любых условиях содержатся частички пыли и песка. Вследствие попадания данных частичек в проточную часть происходит эрозия рабочих лопаток. В основном эрозия вызвана попаданием твердых частицы размером более 10 мкм. Эрозионные повреждения чаще встречаются в авиационных двигателях, так как обычно наземные газотурбинные установки снабжены системами фильтрации, поступающего воздуха, и попадание в газоздушный тракт крупных частиц практически исключено.

На характер эрозионного износа достаточно сильно влияют размер, форма и природа попадающих частиц. Наиболее сильная эрозия наблюдается при эксплуатации изделий в сухом климате с повышенным содержанием пыли, песка. Также эрозионный износ может возникать при промывке

газовоздушного тракта, в случае если размер распыляемых капель воды превышает допустимый. Для борьбы с эрозионным износом деталей проточной части компрессора применяют защитные покрытия (рисунок 1.1б)

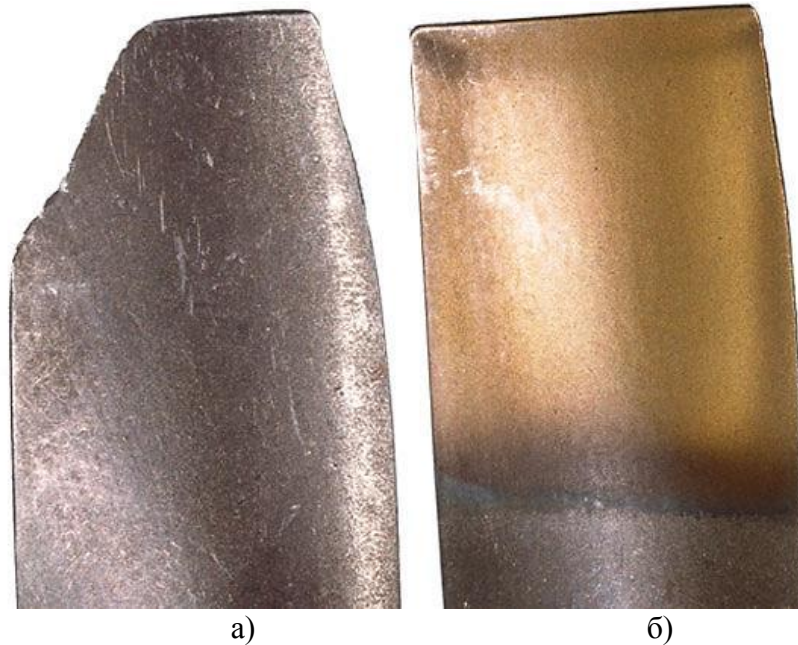


Рисунок 1.1 - Лопатки компрессора ГТД без покрытия (а) и с эрозионностойким покрытием (б) [7]

Повреждения лопаток посторонними предметами связано с попаданием в проточную часть птиц, града, кусков протекторов авиашин, обтирочной ветоши, инструмента, гаек и т.п.

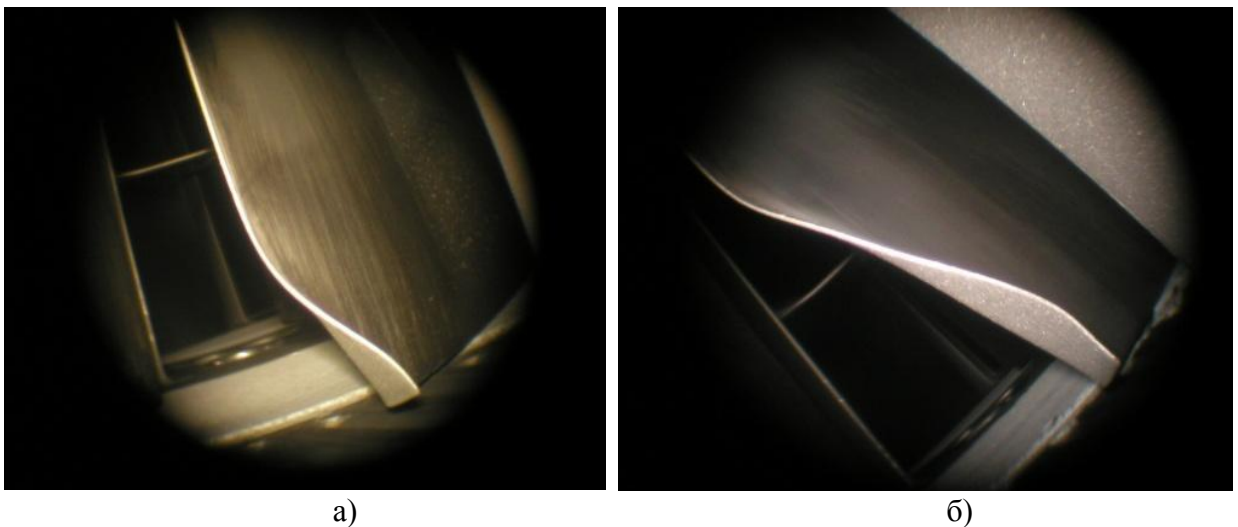


Рисунок 1.2 - Загибы уголков лопаток компрессора двигателя ПС-90А (а-б) [8]

Коррозионные повреждения образуются при эксплуатации изделий в климатических условиях с повышенным содержанием агрессивных (коррозионно-активных) примесей (эксплуатация в морских условиях, в тропическом климате, в промышленной атмосфере), таких как хлор и сера. Также на поверхности деталей, имеющих коррозионные повреждения, часто обнаруживают такие элементы, как калий, натрий и кальций.



Рисунок 1.3 - Коррозионные повреждения на поверхности лопаток компрессора, изготовленных из нержавеющей стали [9]

Еще одним повреждением, оказывающим отрицательное воздействие на работу компрессора и представляющим интерес в данной научно-исследовательской работе, является углеродсодержащие загрязнения, образующиеся на деталях проточной части компрессора в процессе эксплуатации.



а)



б)

Рисунок 1.4 - Вид углеродсодержащих загрязнений, образующихся на входном направляющем аппарате ГТД (а, б) [4,11]

Наличие загрязнений проточной части можно установить визуально, в том числе с применением оптических приборов, а также по изменению параметров работы двигателя (например, увеличение температуры газов

перед турбиной, изменение частот вращения роторов высоко и низкого давления, увеличение расхода топлива и др.) [10].

## **1.1 Углеродсодержащие загрязнения в проточной части компрессора**

### **1.1.1 Причины образования загрязнений**

Образование загрязнений на деталях проточной части компрессора может происходить по разным причинам. В первую очередь это существенно зависит от условий эксплуатации ГТД. Воздух, поступающий в компрессор, может содержать большое количество взвешенных частиц с различными физико-химическими свойствами, оказывающих эрозионно-коррозионное, абразивное и налетообразное воздействие на элементы проточных частей ГТД [1]. Как правило, образование загрязнений связано с всасыванием адгезионных («липких») материалов, таких как пары масел, дым, морская соль, промышленные испарения и др. [3], а также вязких видов загрязнений (частиц глины, речного ила и т.п.). Также необходимо учитывать, что абразивная пыль может также осаждаться на рабочих лопатках, например, латеритная пыль из Юго-Восточной Азии - рыхлая, относительно безвредная по эрозионным свойствам [2]. В таблице 1.1 представлены основные источники загрязнений проточной части компрессора ГТД.

В работе [12] указывается на то, что надежная работа газотурбинного двигателя в условиях загрязненной атмосферой обеспечивается применением комплексных воздухоочистительных устройств (КВОУ) (рисунок 1.5). Однако даже современные высокоэффективные фильтры не обеспечивают полной очистки воздуха и устранения загрязнений компрессора [4,13]. Остаточная запыленность после современных фильтрующих устройств находится на уровне 0,3-0,45 мг/м<sup>3</sup>. Загрязнение лопаток компрессора обуславливается в основном частицами диаметром до 2 мкм, масса которых составляет 80-90 % от общей массы пыли после фильтра [14].

Таблица 1.1 - Основные источники загрязнений проточной части ГТД [4]

Тип частицы	Размер, мкм
Пыль	1-300
Пары масла	0,02-1
Летучая зола	1-200
Частицы соляного тумана	Менее 10
Смог	Менее 2
Дым	Менее 1
Глина	Менее 2
Канифольный дым	0,01-1
Угольная пыль	1-100
Металлургическая пыль и пары	0,001-100
Аммоний	0,1-3
Углеродная сажа	0,01-0,3
Серный туман	0,3-3
Пигментные краски	0,1-5

В работе [16] также отмечается невысокая эксплуатационная пригодность воздухоочистительных устройств газотурбинных перекачивающих агрегатов. Из механизма образования загрязнений в проточной части осевого компрессора следует, что механические частицы органической природы, содержащиеся в воздухе, образуют загрязнения при размере частиц от 5-6 мкм и выше. В технических условиях ряда газотурбинных агрегатов требования к очистке воздуха фильтрами воздухоочистных устройств значительно занижены, допускается прохождение механических частиц размером до 20 мкм, а в некоторых случаях и до 40 мкм.



Рисунок 1.5 - КВОУ на компрессорной станции «Портовая» магистрального газопровода «Северный поток» [15]

Многими исследователями [3,14,14,17,19] отмечается, что образование углеродсодержащих загрязнений на деталях проточной части, связано с попаданием загрязнителей выделяемых различными узлами самого ГТД/ГТУ. Например, подсос или заброс масла из подшипника вследствие неудовлетворительной работы уплотнительных элементов. Источником загрязнения могут быть выпускные газы собственной энергетической установки от главных и вспомогательных двигателей, которые попадают в воздухоприемный тракт ГТД.

В ГТУ проточная часть загрязняется в случае просачивания загрязненного воздуха из машинного отделения через неплотности воздухоприемной шахты или при приеме воздуха из машинного отделения, где имеются утечки топлива или масла [20].

Повышенное загрязнение особенно характерно при эксплуатации авиационных ГТД в наземных условиях, например, при использовании их в качестве привода газоперекачивающих агрегатов в магистральных газопроводах [21].



В общем случае воздух, забираемый двигателем, представляет собой полидисперсную систему частиц аэрозоля, состоящую как из твердых (пыль, соли, продукты неполного сгорания), так и жидких частиц (масло, вода, топливо), размеры которых находятся в интервале от 0,1 до 300 мкм. Наличие во всасываемом аэрозоле жидких фракций, с одной стороны, существенно увеличивает возможность загрязнения поверхностей, а с другой - затрудняет их очистку.

При взаимодействии с поверхностями проточной части капли масла деформируются, растекаются и прилипают к металлу. Попадающие на масло частицы пыли увеличивают вязкость слоя отложений. При повышенном давлении и температуре происходит затвердевание и локализация слоя отложений и превращение его в нагар [4,14,22].

В процессе работы ГТД или ГТУ происходит стабилизация слоя отложений (загрязнений). Загрязнения на поверхности лопаток компрессора оказываются под воздействием давления воздушного потока, вызывающего сдвигающие напряжения на поверхности. В начале силы сцепления между частицами масла и металлической поверхностью (адгезия) превосходят силы сдвига. По мере нарастания слоя отложений на лопатке силы сцепления между частицами (когезия) уменьшаются и скорость течения потока, вследствие уменьшения площади проходного сечения увеличивается, поэтому при определенной толщине слоя отложений наступает равновесие между силами когезии и силами сдвига. Частицы масла и пыли, попадающие на такой слой, уже не удерживаются, и поток воздуха сдувает их [14].

### **1.1.2 Состав и свойства загрязнений**

Как было сказано выше в процессе эксплуатации в результате длительного воздействия высоких температур и давления на поверхности лопаток образуется слой углеродсодержащих загрязнений. Загрязнения могут быть продуктами высокомолекулярных продуктов превращений

углеводородных топлив (асфальтены, карбены.) [23]. Основной компонент загрязнений - карбены являются продуктами полимеризации циклических углеводородов (полифенилены, поликсилилены). Эти соединения (карбены и карбоиды) составляют 80-85 %, асфальтены - 4-7%, смолы - 6-14%, зола - 1,5%. Из других загрязнений можно отметить смолистые отложения и осадки, имеющие сложный состав: масло 50-85%, топливо 1-7%, оксикислоты 2-15% и др. [24].

В состав сформированных при эксплуатации углеродсодержащих загрязнений, согласно результатам проведенного рентгеновского фазового анализа [25], входят углеводороды, шпинели, сульфаты, сульфиты.

Спектр, полученный в работе [19], свидетельствует о наличии на поверхности эксплуатировавшихся компрессорных лопаток слоя отложений, основными элементами которого являются углерод, кислород, натрий кремний и хлор (рисунок 1.6).

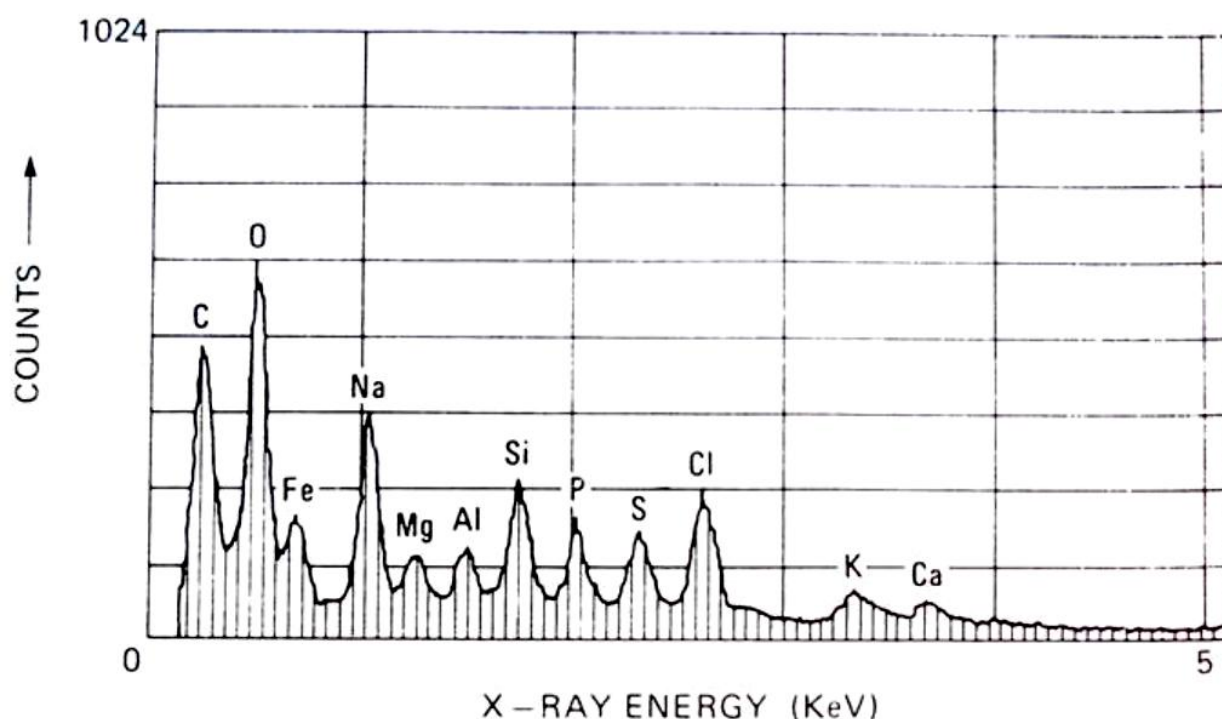


Рисунок 1.6 - Спектр, полученный с поверхности лопаток компрессора после эксплуатации [19]

Проведенные в работе [22] физико-химические, элементные и структурно-групповые анализы отложений, обладающих высокой адгезией, позволили их разделить на три группы:

- первая, нерастворимая в ацетоне (порядка 70%);
- вторая, растворимая в ацетоне, но не растворимая в гексане (порядка 25%);
- третья, растворимая и в ацетоне, и в гексане (порядка 5%).

В работе [26] отложения разделены авторами на водорастворимые и нерастворимые (остатки углеводов и кремний). Часто рН отложений равен четырем и ниже. Также отмечается, что отложения могут содержать хлор. Необходимо отметить, что наличие хлора и воздействие высоких рабочих температур (до 650°C) может вызывать горячую солевую коррозию деталей из титановых сплавов.

Степень загрязнения рабочих лопаток компрессора убывает вдоль проточной части по ходу движения воздуха [17,18,21]. Результаты, приведенные в работе [17] свидетельствуют о том, что в наибольшей степени загрязняются лопатки первых четырех-пяти ступеней. Лопатки входного направляющего аппарата (ВНА), а также рабочие и направляющие лопатки первой ступени имеют большее количество отложений на выпуклой стороне профиля, чем на вогнутой. У лопаток со второй по пятую ступеней массы отложений на выпуклой и вогнутой сторонах рабочих и направляющих лопаток примерно равны друг другу. На лопатках ВНА наибольшие отложения у периферии, а у рабочих и направляющих лопаток с первой по пятую ступень зона наибольших отложений располагается у втулки с выпуклой и вогнутой сторон профиля.

Об аналогичном характере распределение загрязнений на лопатках компрессора в процессе эксплуатации указывают и зарубежные специалисты в работах [19] и [27]. Так, например, 40-70% всех отложений приходится на лопатки ВНА (рисунок 1.7). Остальное количество отложений

распределяется между последующими ступенями в порядке убывания (рисунок 1.8, 1,9).

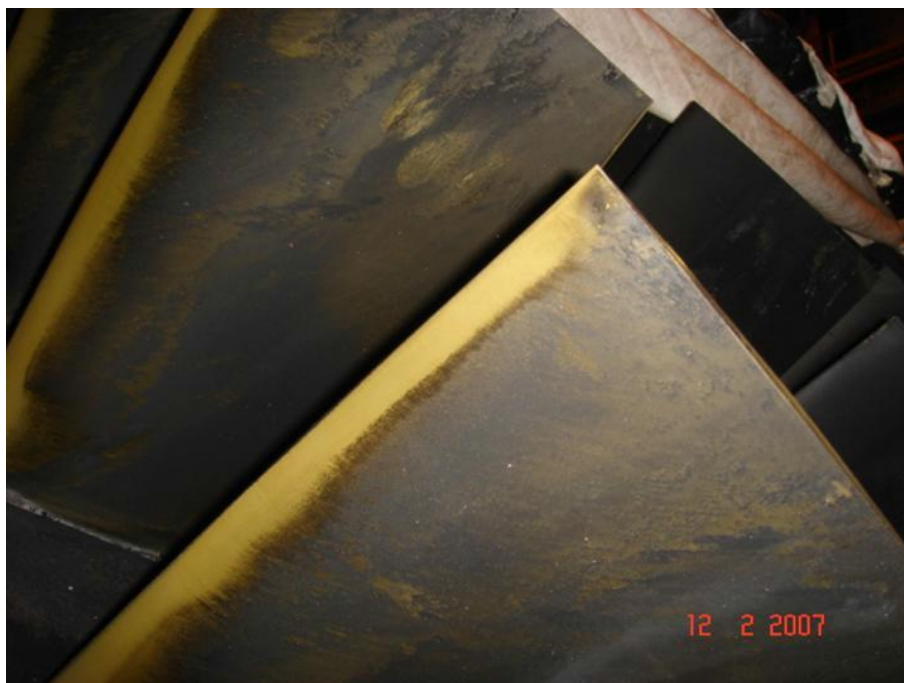


а)

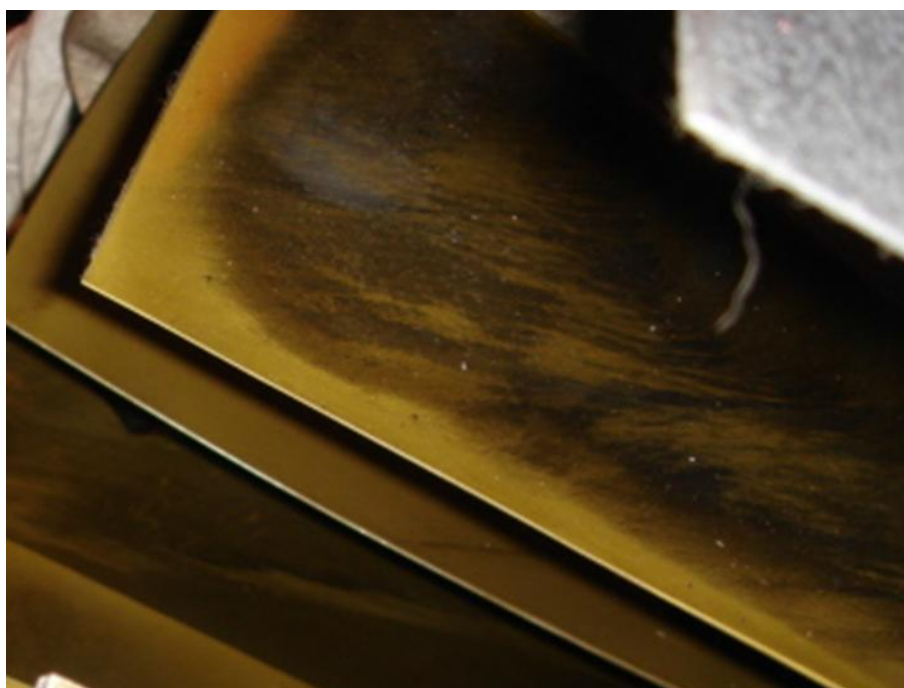


б)

Рисунок 1.7 - Внешний вид загрязнений на лопатках ВНА ГТУ (а, б) [19]



а)



б)

Рисунок 1.8 - Внешний вид загрязнений на лопатках первой ступени ротора компрессора ГТУ (а, б) [19]



Рисунок 1.9 - Внешний вид загрязнений лопаток с первой по четвертую ступень компрессора ГТУ [19]

Исследования поверхности компрессорных лопаток седьмой ступени ротора компрессора высокого давления ГТД после 260 часов наработки, проведенные специалистами ОАО «ММП им. В.В. Чернышева [25], показали, что толщина слоя загрязнений на различных участках изменялась в пределах от 40 до 80 мкм. В работе [19] указывается, что толщина слоя загрязнений (нагара) на лопатках компрессора может варьироваться от 25 до 500 мкм.

### **1.1.3 Влияние загрязнений проточной части компрессора на параметры работы двигателя**

На сегодняшний день нет противоречий в том, что, скапливаясь на поверхности лопаток, загрязнения ухудшают параметры работы двигателя. Это следует из многочисленных отечественных [12,17,20-22,28-31] и зарубежных работ [4,5,11,13,32-34].

Компрессор газовой турбины - это последовательно расположенные друг за другом роторные и статорные ряды (рабочие и направляющие аппараты), которые в совокупности составляют ступени компрессора и очень тщательно должны быть подогнаны друг к другу. Лопатки компрессора имеют очень гладкие аэродинамические профили. Скапливая на поверхности, загрязнения повышают шероховатость поверхности и изменяют профиль поверхности, что приводит к ухудшению аэродинамических характеристик лопатки. Снижается расход воздуха, проходящего через компрессор, в результате чего уменьшаются степень повышения давления, КПД компрессора и также полезная мощность ГТД, увеличивается расход топлива [4,5].

Скопление загрязнений на компрессорных лопатках приводит к изменению скоростей потока воздуха, соотношению давлений между ступенями, в результате чего могут возникать помпажные явления. Работа компрессора в таких условиях не исключает поломки и разрушения его лопаточного аппарата [3,28,35,36].

В результате загрязнения лопаточного аппарата КПД компрессора в зависимости от типа двигателя может снижаться до 5%, полезная мощность ГТД до 13%, а расход топлива повышаться до 10%.

## **1.2 Технологии очистки деталей проточной части компрессора газотурбинного двигателя от загрязнений**

### **1.2.1 Способы очистки в процессе эксплуатации**

Для восстановления характеристик проточной части компрессора и ГТД в целом в процессе эксплуатации рекомендуется проводить периодические очистки проточной части компрессора в режиме «холодная прокрутка» (off-line) и/или в режиме «на ходу» (on-line). В качестве очищающего агента в основном применяют твердотельные очистители,

жидкие моющие средства и воду. Режимы и условия очистки могут комбинироваться с целью получения желаемого результата и минимизации издержек [37-45].

Очистку твердотельными очистителями проводят на работающем агрегате («на ходу»). Такие очистители должны обладать хорошим очищающим свойством и не вызывать эрозию лопаток. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют твердые растительные вещества, например, скорлупа орехов, косточка абрикосов, алычи и др. Наибольшее распространение получил твердый органический очиститель, представляющий собой тонко размолотую смесь скорлупы грецкого ореха и абрикосовых косточек, размер частиц которой лежит в пределах 1,0-1,5 мм. Химический состав крошки: С - 7%, ( $N_T+O_T$ ) - 43%,  $H_T$  - 6%, зола 1,4%, S - 0,2%. Влажность крошки около 7 %. Теплота сгорания - 19260 кДж/кг. В качестве твердых очистителей могут применяться шелуха пшеницы, риса или сами зерна в дробленном виде [14,18,22,26,28,31,36,46]. Пример установки, в которой в качестве очищающего агента используются рисовые гранулы, показан на рисунке 1.10.

Крошка подается специальной пневматической системой. Режим подачи выбирается экспериментально. Например, для ГТД рекомендуются следующие параметры: скорость подачи крошки - 0,15 кг/с, относительный расход, по отношению к расходу воздуха - 0,005-0,006; окружная скорость лопаток компрессора в момент подачи крошки ~ 200 м/с. Крошка, попавшая на горячие части газового тракта на них не откладывается, т. к. при температуре 550-700°C полностью выгорает и выдувается. В свою очередь частицы, находящиеся в потоке, могут не успеть выгореть, и будут выноситься слегка обуглившись. Вся операция очистки выполняется за 6-10 мин. При этом отпадает необходимость остановки двигателя и его просушки [47].

Очистка проточной части компрессора твердыми очистителями может носить двоякий характер. С одной стороны, такая очистка позволяет



повысить КПД, но с другой - повышает вероятность возникновения отказов оборудования, т.к. может происходить закупоривание уплотнений, каналов смазки, а также повреждение защитных покрытий деталей компрессора [22,28,30,31,35]. В связи с этим очистка с использованием твердых очистителей должна проводиться только при сильных загрязнениях и иметь несистематический характер [48].

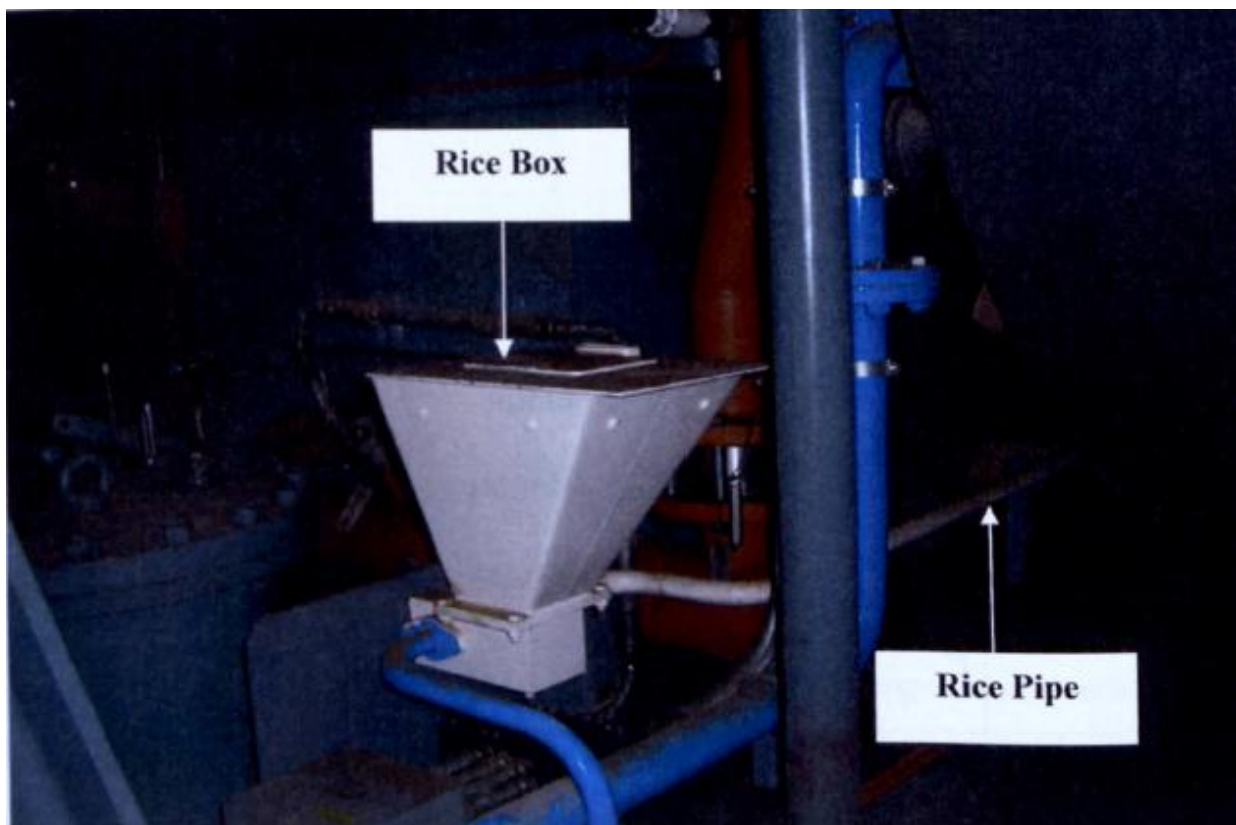


Рисунок 1.10 - Установка для сухой очистки проточной части компрессора ГТУ с использованием риса [46]

Запатентован способ очистки проточной части газотурбинного двигателя [49], который заключается в подаче твердых монодисперсных частиц в газоздушный тракт. В качестве подаваемых частиц может быть использован сухой лед, снежные частицы, частицы водяного льда или наста. Объем подачи составляет от 1 до 10% массового расхода воздуха двигателя. Также к указанным частицам сухого или водяного льда добавляют бикарбонат натрия в количестве 1-5% от объема льда. Указанный способ

может быть использован как на работающем двигателе, так и режиме «холодной прокрутки». Основным преимуществом в сравнении с «мокрыми» способами очистки является отсутствие жидких отходов, что уменьшает загрязнение окружающей среды.

Стоит отметить патент [50] на способ сухой очистки поверхностей лопаток компрессора абразивными компонентами. Согласно формуле изобретения воздушный поток предварительно подвергают турбулизации и обработке ультрафиолетовым излучением с длиной волны 126-189 нм, а также образующимся озоном, которые испаряют аэрозоли и осушают молекулярную пленку присутствующих в воздушном потоке загрязняющих частиц. Так как капли аэрозоля и твердые частицы имеют различные размеры и массу, то в первую очередь сгорают и осушаются капли аэрозоля и твердые частицы минимальных размеров (0,1-2 мкм) и массы, на которые слабо воздействует центробежная сила при вращении ротора компрессора. В исходном состоянии, когда отсутствует влияния на эти частицы и аэрозоли, они являются источниками начала загрязнения лопаток компрессора. Осушенные частицы больших размеров (2-100 мкм) обеспечивают «мягкое» абразивное очищение поверхности лопаток компрессора, причем такое очищение происходит постоянно, а не циклически, как при вводе различных очистителей.

В настоящее время достаточно много работ посвящено разработкам систем очистки [13,51-55], моделированию процессов очистки и исследованию влияния промывок проточной части компрессора на характеристики ГТД [11,46,56-62].

Off-line промывки почти всегда проводят с использованием моющего средства. Обычно такие промывки чрезвычайно эффективны в плане повышения мощности ГТУ (рисунок 1.11). Очень важно использование качественной воды и соблюдение соотношения моющего средства и воды. Время простоя при такой промывке в основном определяется временем

охлаждения двигателя. Для сверхмощных двигателей это может занимать от 8 до 10 часов, для малых ГТУ - от 1,5 до 3 часов.

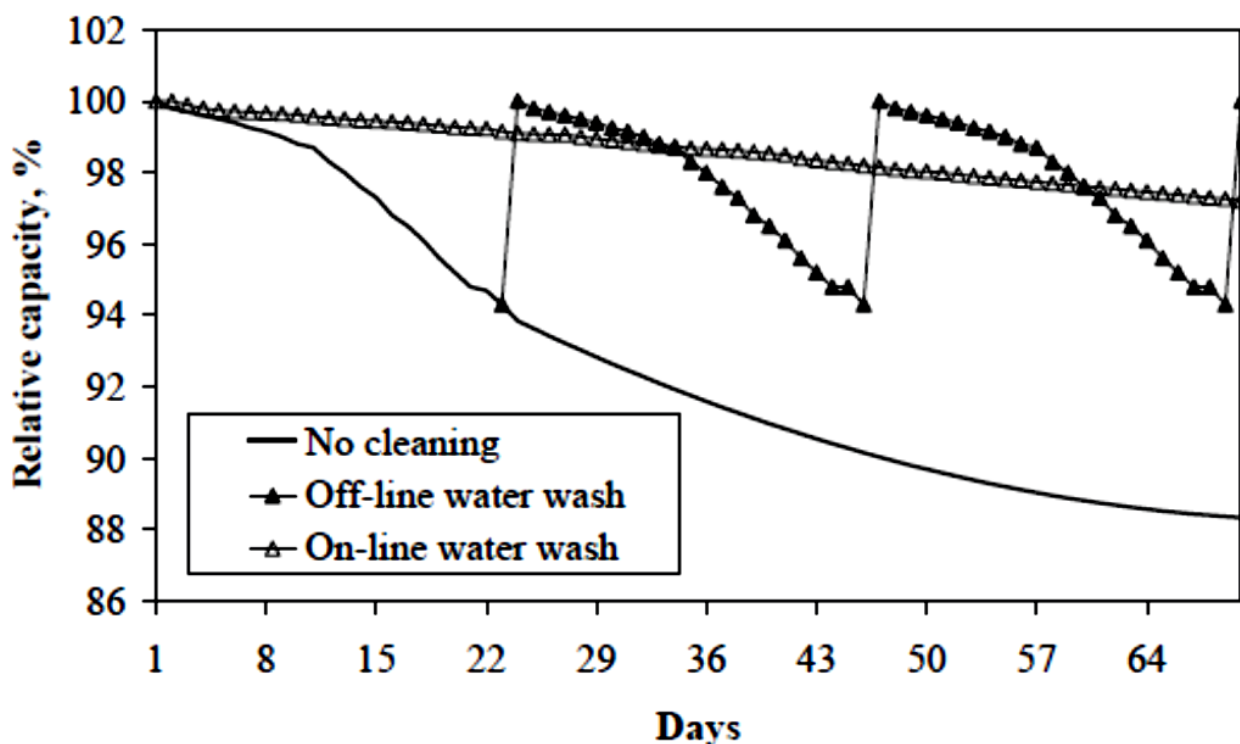


Рисунок 1.11 - Влияние off/on-line промывок на относительную мощность ГТУ [37]

Главная цель on-line промывок расширить время работы ГТУ между off-line промывками путем уменьшения наращивания отложений на лопатках и таким образом сокращения потерь мощности. Как и при off-line промывке обязательно применение деминерализованной воды. Не рекомендуется выполнять on-line промывку на загрязненном двигателе, потому что большое количество загрязнений, удаленных с первых ступеней компрессора мгновенно оседают на последующих ступенях. В связи с этим должны выдерживаться короткие временные промежутки между on-line промывками (приблизительно каждые 3 дня). Продолжительность on-line промывки может варьироваться согласно степени загрязнения двигателя и опыту обслуживающей организации. Типичный цикл on-line промывки занимает 10-20 минут моющим средством и такой же цикл с использованием деминерализованной водой.

Наиболее эффективным и экономически выгодным является применение off-line промывок во время запланированного отключения ГТУ с последующим применением on-line промывок. Правильное сочетание таких промывок позволит избежать потерь производительности и замедлить естественное ухудшение характеристик.

Как правило, при on/off- line промывках инъекцию воды или моющего раствора проводят под давлением с помощью специальных устройств, которые располагают у воздухозаборника (рисунок 1.12,1.13). Конструкция таких устройств должна обеспечивать полное смачивание поверхности лопаток компрессора, давать оптимальный размер капель и обеспечивать эффективную очистку всех ступеней компрессора. Оптимальным считается размер капель не более 75 мкм, т.к. капли большего размера могут вызывать эрозию.



Рисунок 1.12 - Устройство для промывки проточной части ГТУ производства компании GTE [51]



Рисунок 1.13 - Система промывки проточной части ГТУ производства компании General Electric [55]

Применяемый моющий раствор должен проникать, растворять и удерживать в себе загрязнений для исключения их оседания на последующих ступенях компрессора.

Вопрос применения определенного вида моющего раствора или только воды должен решаться исходя из анализа состава загрязнений на лопатках компрессора. Так, например, согласно стандарту организации ОАО РАО «ЕЭС России» СТО 17230282.27.040.002-2 «Газотурбинные установки. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования» при капитальном ремонте проводятся работы по определению количества и состава отложений в проточной части. Также согласно указанному СТО очистка проточной части «на ходу» должна проводиться не реже одного раза в месяц.

В случае применения в качестве промывающей жидкости только воды может происходить вымывания только водорастворимых отложений, что в дальнейшем будет способствовать наращиванию загрязнений. Поэтому для очистки рекомендуется использовать как воду, так и моющие растворы.

Горячая промывочная вода лучше размягчает загрязнения и предотвращает термический удар, таким образом, уменьшая время простоя двигателя. Однако для подогрева воды до 60-80°C требует системы нагрева, дополнительный резервуар и трубопровод [26,37,56,57].

Использование керосина или дизельного топлива в качестве очищающих жидкостей является небезопасным в виду их легковоспламеняемости.

Спектр очищающих жидкостей, предлагаемых к использованию, очень широк. Достаточно широко представлены на рынке и используются в промышленности продукты компаний McGean, Socomore, ЗАО «Турботект Санкт-Петербург», Лемикс, Дексан. Некоторые наиболее распространенные растворы (концентраты) для проведения промывки компрессоров: M-1(P), M-2(P), TSP-3030, TSP-5050, TSP-A283, Cee Vee EPC-1, HDL 202, Синвал.

Перед применением очищающей жидкостей следует убедиться в отсутствии их коррозионной агрессивности по отношению к применяемому материалу или детали.

В настоящее время нет единого подхода к применению on/off- line промывок. Такие свойства как размер капель, скорость капель, давление жидкости варьируются в зависимости от производителя. Это мешает операторам (пользователям) выбрать лучшую систему для промывки.

Введение промежуточных очисток в процессе эксплуатации однозначно положительно влияет на характеристики работы ГТД и ГТУ, однако на данный момент не существует однозначных данных по периодичности проведения промывок и очисток, что вероятно связано с конструктивными особенностями различных компрессоров, различными

условиями и режимами эксплуатации, а также технической исправностью различных узлов ГТД.

Если многократные очистки в процессе эксплуатации не дают желаемого эффекта (повышение мощности, снижение расхода топлива, уменьшение вибраций и т.п.) и при визуальном осмотре обнаруживаются участки с остатками загрязнений, то необходимо осуществлять разбор двигателя и производить очистку деталей проточной части в заводских условиях.

### **1.2.2 Способы очистки в заводских условиях**

Основные методы очистки деталей от загрязнений, широко применяемые на авиаремонтных предприятиях, представлены на рисунке 1.14.

В учебном пособии [63] освещены некоторые основные составы и компоненты, применяемые для химической очистки поверхности деталей. В частности для обезжиривания применяют керосин, бензин, хлорированные углеводороды (трихлорэтан, дихлорэтилен, дихлорэтан и др.). К недостаткам органических растворителей следует отнести то, что бензин и керосин легко воспламеняются, а хлорированные углеводороды токсичны.

Электрохимическое обезжиривание проводят в щелочных растворах, состоящих из едкого натра, фосфорнокислого натрия, углекислого натрия, жидкого стекла и других веществ при температуре 60-80°C и плотности тока 300-1000 А/м<sup>2</sup>. При катодном электрохимическом обезжиривании, вследствие электролиза раствора щелочей, происходит выделение водорода. При этом поверхность деталей может сильно насыщаться водородом и становиться хрупкой. Также для проведения электрохимического обезжиривания требуется наличие дополнительного оборудования - источник тока.



Рисунок 1.14 - Основные методы очистки деталей от углеродсодержащих загрязнений [24]

В качестве моющих сред при ультразвуковой очистке используют воду, водные растворы щелочей и поверхностно-активных веществ, растворы кислот, органические растворители. Составы наиболее распространенных водных моющих растворов, применяемых при ультразвуковой очистке, а также основные рекомендации по их использованию представлены в таблице 1.2. Типы органических растворителей, применяемых при ультразвуковой очистке, их назначения и рекомендации по применению представлены в таблице 1.3.



Таблица 1.2 - Составы некоторых моющих растворов [63]

Компоненты	Загрязнения	Материал очищаемых изделий	Температура, °С	Содержание, г/м <sup>3</sup>
Едкий натр Сода кальцированная Жидкое стекло Нитрид натрия Неионогенное ПАВ Сульфанол	Обильные масляные и жировые загрязнения, консервационные смазки	Сталь	60-80	20-30 10-20 20 5-10 5 0,5-1,5
Тринатрийфосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол	Полировочные пасты, консервационные смазки, минеральные масла и жировые пленки	Сталь, медные сплавы	55-80	20-35 3 0,5-1,5
Сода кальцированная Жидкое стекло Неионогенное ПАВ	То же	То же	55-80	15-20 8-10 3
Дистиллированная вода	Пыль, вода	Полимерные пленки	45-55	-

Таблица 1.3 - Органические растворители, применяемые при ультразвуковой очистке [63]

Компоненты	Загрязнения	Материал очищаемых изделий	Температура, °С	Содержание, г/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5
Трихлорэтан	Минеральные масла, парафин, смолы пасты, каучук	Все металлы кроме алюминия	5-70	0,01
Четыреххлористый углерод	Минеральные масла, парафин, смолы пасты, воск	Сталь	5-70	0,02

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5
Бензин	Минеральные масла, парафин, пасты	Все металлы, кроме цинка, пластмассы	20	0,1-0,3
Метанол	Канифоль и канифольные флюсы, смолы, жиры, масла	То же	20	0,05
Этанол	То же	То же	20	0,1
Ацетон	Канифоль, краски, жиры, масла (животные и растительные)	Все металлы	20	0,2

В работе [48] предложена химическая технология очистки лопаток компрессора с плотными загрязнениями, которая заключается в выдержке лопаток в водном растворе следующего состава: 1% жидкого стекла, 1% кальцинированной соды, 0,1% хромпика, 1% мыла. Лопатки выдерживают в ванне 60-90 мин. при температуре 90-100°C, а затем такое же время в холодном растворе. Загрязнения удаляют жесткими волосяными щетками, деревянными палочками или содой. После промывки детали обдувают сжатым воздухом.

В работе [1] представлена универсальная структура технологического процесса восстановления компрессорных лопаток из титановых сплавов ГТД ТВ3-117 с нанесением ионно-плазменных покрытий. После осмотра и дефектации лопаток проводится предварительная очистка лопаток от коррозии и загрязнений. Очистка элементов и поверхностей лопаток может выполняться:

1) Посредством легкой обдувки мелким электрокорундом или карбидом кремния черным или зеленым на основе пневмо абразивно-струйной обработки;

2) За счет очистки в ультразвуковой ванне. В качестве обрабатывающей жидкости в ванне используется раствор следующего состава: тринатрийфосфат технический 30-40 г/л; сода кальцинированная техническая 20-30 г/л; поверхностно-активное вещество ОП-7 или ОП-10 3,5 г/л. Температура раствора 50-60°C. Далее выполняется промывка лопаток под проточной водой.

Запатентован способ [64] подготовки поверхности металлических деталей к оперативному выявлению прижогов измерением работы выхода электрона (РВЭ). Перед измерением РВЭ необходимо обезжирить деталь промывкой в растворителе «Нефрас 50/170» с добавлением 1-2 масс. % антикоррозионной присадки «АКОР-1». Затем контролируемую деталь следует промыть просушить и протереть петролейным эфиром. РВЭ определяется измерением контактной разности потенциалов КРП прибором «Поверхность», разработанным в Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского. Для титановых сплавов КРП должна быть не менее 240 мВ (при условии использования измерительного электрода из технического никеля). В случае не соответствия КРП указанному значению операции подготовки поверхности следует повторить. Необходимо отметить, что прибор «Поверхность» позволяет определять не только размеры, глубину и интенсивность шлифовочных прижогов лопаток из титановых сплавов компрессоров ГТД, возникающих при производстве и ремонте, но и контролировать качество очистки поверхности, определять степень активации поверхности, поверхностного-пластического деформирования и др. [65,66].

Государственным предприятием «Ивченко-Прогресс» совместно с Киевским международным университетом гражданской авиации (КМУГА) разработан эффективный метод очистки поверхности деталей авиационный

техники - аэрозольно-гидродинамическая очистка или аэрогидродинамическая очистка (АГД-очистка), основанная на эффекте Ребиндера. Данный вид бластинговой (струйной) очистки не изнашивает металл, не перегревает и не деформирует поверхностные слои, не меняет шероховатость поверхности, хорошо очищает кратеры и микротрещины и имеет низкое пылеобразование. Использование суспензий на основе природных материалов (глина, мел, кальцит) делает этот способ экологически чистым и в большинстве случаев исключает обдувку электрокорундом. Также стоит отметить малый расход воды и реагента.

АГД-очистка является альтернативой существующим способам очистки, отличается высокой степенью универсальности, простотой применяемого оборудования, точностью регулирования и поддержания процесса. Таким способом можно очищать детали авиадвигателей от высокотемпературного нагара, коррозии, оксидных пленок, различных загрязнений, а также подготавливать поверхности деталей под неразрушающий контроль (методом цветной дефектоскопии) и под нанесение защитных покрытий. Скорость очистки от 6 до 32 м<sup>2</sup>/мин. [67,68]. Вид установки для проведения АГД-очистки представлен на рисунке 1.15.

Еще одним видом перспективной струйной очистки является ice или криогенный бластинг. В качестве очищающего агента используется сухой лед (твердая фаза диоксида углерода). В специальном аппарате для струйной очистки при помощи сжатого воздуха гранулы размером до 3 мм разгоняются до скорости близкой к скорости звука и при помощи специального пистолета подаются на загрязненную поверхность. Очистка поверхности достигается за счет нескольких эффектов. Во-первых, гранулы сухого льда имеют значительно более низкую температуру, чем очищаемая поверхность (температура сублимации сухого льда при нормальном давлении - минус 78,5°С). Резкое снижение температуры поверхностного слоя вызывает эффект «термического шока», при котором охлажденные до хрупкого состояния загрязнения легко отслаиваются от поверхности. Во-вторых, при соударении



Рисунок 1.15 - Установка Multiblast для проведения АГД-очистки [68]

с поверхностью объекта к гранулам сухого льда подводится огромное количество тепла. В результате теплообмена твердые частицы двуокиси углерода мгновенно нагреваются и переходят в газообразное состояние, стремясь расшириться в объеме в сотни раз. Образовавшийся газ, частично проникая в пространство между загрязнениями и очищаемой поверхностью, образует так называемый «газовый клин», отламывающий под давлением частицы загрязнений от поверхности. В-третьих, за счет кинетической энергии гранул сухого льда происходит перманентное механическое воздействие на очищаемую поверхность. Вид оборудования для проведения очистки указанным способом представлен на рисунке 1.16.

К преимуществам струйной очистки сухим льдом стоит отнести возможность проведение очистки деталей без демонтажа, экологичность (очистка производится без применения химикатов), отсутствие вторичных отходов (не требуется удалять загрязненную воду или абразивный материал). К недостаткам стоит отнести высокий уровень шума (до 125 дБ),

возможность пылеобразования, а также возможность превышения предельной допустимой концентрации углекислого газа [69-71].



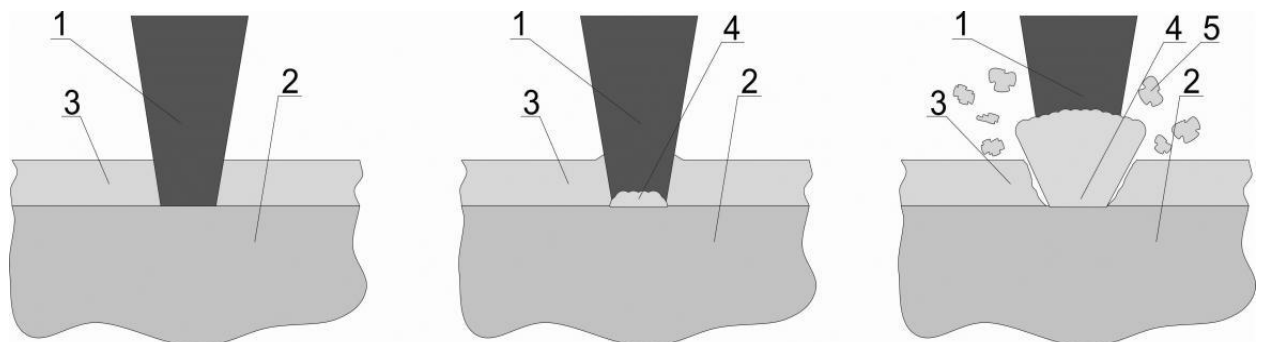
Рисунок 1.16 - Установка для проведения очитки сухим льдом (а) и генератор сухого льда (б) фирмы Kärcher [70]

Авторами статьи [72] представлена информация по снятию углеродсодержащих загрязнений с направляющих аппаратов ГТД с использованием виброабразивной обработки. Данный метод обработки относится к высокоэффективным и представляет собой обработку абразивными гранулами в специальных вибрационных установках. К его достоинствам относятся высокая производительность, отсутствие риска образования прижогов и исключение влияния ручного труда полировщиков и слесарей на результат обработки. Однако существующие методы назначения условий виброабразивной обработки не позволяют назначать наиболее производительные условия обработки (зернистость абразивных гранул, время обработки), так как не учитывают особенности геометрии таких специфических деталей, как лопатки компрессора ГТД. Иными словами при обработке деталей и узлов различной формы необходимо производить обработку опытной партии, с целью подбора условий обработки [73].

В работе [74] авторами разработана ремонтно-восстановительная технология постэксплуатационного состояния компрессорных лопаток ГТД, в которой очистку лопаток от эксплуатационных загрязнений предлагается проводить электроимпульсным методом. Какие-либо данные по режиму обработки не приводятся.

Удаление органических и неорганических загрязнений с металлических поверхностей можно проводить путем применения лазерной технологии очистки. Механизм лазерной очистки представлен на рисунке 1.17.

Лазерный луч, проходя через пленку загрязнения и попадая на поверхность материала, испаряет часть материала на обрабатываемой поверхности. Под давлением горячих паров слой загрязнения разрушается. Процессы лазерного нагревания, испарения и абляции материала с образованием плазмы, а также быстрое тепловое расширение и возникновении ударных волн лежат в основе механизма лазерной очистки.



1 - лазерный луч; 2 - загрязненный материал; 3 - загрязнение; 4 - облако испаренного вещества; 5 - частицы загрязнения, удаленные с поверхности материала.

Рисунок 1.17 - Механизм лазерной очистки [75]

Данная технология является бесконтактным, безабразивным, высокопроизводительным и экологически чистым способом очистки поверхностей перед проведением различных технологических операций, в том числе покраски, нанесения защитных покрытий, сварки и т.д. Однако до недавнего времени применение лазерной очистки ограничивалось высокой стоимостью лазеров, недостаточной надежностью и низким значением КПД

(2-2,5% для твердотельных лазеров с ламповой накачкой и 8-12% для газовых CO<sub>2</sub>-лазеров). Ситуация коренным образом изменилась с появлением волоконных лазеров, чьи срок службы и надежность, высокий КПД, стабильность параметров и удобство использования с лихвой окупают издержки на их приобретение и эксплуатацию.

Применение мобильных лазерных установок для выполнения очистки деталей ГТД позволяет производить очистку без их демонтажа. Это существенно сокращает время выполнения регламентных работ и, соответственно, позволяет экономить средства за счет уменьшения времени простоя дорогостоящего оборудования [67,69,75].

Необходимо отметить, что для различных двигателей отличаются условия и продолжительность наработки, следовательно, будет отличаться толщина слоя загрязнений на поверхности деталей. В таком случае может потребоваться индивидуальный подбор параметров лазерной очистки (энергии излучения, скорости сканирования). В случае неправильного подбора параметров очистки может наблюдаться либо неполное удаление загрязнений, либо глубокое модифицирование поверхности, что может отрицательно сказываться на физико-механических характеристиках деталей. Данное обстоятельство затрудняет унификацию применения лазерной технологии очистки и требует проведение большой экспериментальной работы для каждого случая ремонта.

Специалистами Московского машиностроительного предприятия им. В.В. Чернышева (МПП им. В.В. Чернышева) [76-79] предложена и опробована технология очистки компрессорных лопаток с применением сильноточных импульсных электронных пучков (СИЭП). В представленной работе [25] обработка компрессорных лопаток из стали ЭП866-Ш седьмой ступени ротора компрессора высокого давления ГТД после наработки 260 часов проводилась на ускорителе «GESA-1» (энергия электронов - 115 кэВ; длительность импульса - 30-40 мкс; плотность энергии в пучке - 20-55 Дж/см<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения пучка - 30-80 см<sup>2</sup>;



неоднородность плотности по сечению пучка - 5%). Удаление загрязнений удается достичь после облучения двумя импульсами с плотностями энергии 20-22 Дж/см<sup>2</sup>. Для удаления оксидных слоев требуется облучение при более высоких плотностях энергии 50-55 Дж/см<sup>2</sup> (количество импульсов - 4). После удаления загрязнений и оксидных слоев на поверхности лопаток могут образовываться кратеры. Для их удаления проводится облучение в режиме плавления четырьмя импульсами при небольших плотностях энергии (20-22 Дж/см<sup>2</sup>). Для снятия остаточных растягивающих напряжений проводится вакуумный стабилизирующий отжиг при температуре 670°C продолжительностью от 2 до 6 часов.

Свойства лопаток после электронно-лучевой обработки в сравнении с исходным состоянием и состоянием после эксплуатации представлены в таблице 1.4. Из данных таблицы следует, что обработка СИЭП с последующим отжигом обеспечивает увеличение предела выносливости лопаток почти на 45% (в сравнении с состоянием после эксплуатации), уменьшение шероховатости и микротвердости. Также электронно-лучевая обработка увеличивает стойкость против окисления.

Как и в случае с лазерной очисткой перед проведением очистки деталей с различной наработкой с применением технологии СИЭП требуется определение толщины загрязненных и/или окисленных слоев с целью подбора параметров очистки.

Запатентован оригинальный способ очистки деталей авиационной техники от нагароподобных органических загрязнений с использованием микробиологического воздействия на загрязнения. Сущность предлагаемого изобретения [80] заключается в том, что используется способность микроорганизмов, в частности грибов, деградировать загрязнения (нагары), которые возникают в процессе эксплуатации. Загрязнения могут быть субстратами для высших грибов, обладающих высокой деградирующей активностью по отношению к этим соединениям, что дает возможность очищать детали.

Загрязненные детали покрывают суловым агаром для поверхностного культивирования. Далее инокулируют суло-агар и среду грибами, используя для этого либо один штамм, либо смесь нескольких штаммов аскомицентных грибов. При температуре 27-28°C через 20-24 ч поверхность агара зарастает воздушными мицелиями, а через 60-70 ч весь агар покрывается воздушными мицелиями и далее происходит деструкция слоя загрязнений и очищение детали. Продолжительность очистки может составлять от 5 до 12 суток, без учета времени зарастания агаровой среды.

Данный метод очистки обладает определённым рядом преимуществ по сравнению с традиционным методом химической очистки: не требуется нагрев ванн, организация очистных сооружений, значительно снижается расход воды. Однако данный метод требует специальной квалификации персонала, а также проведения стерилизации деталей при температуре 100-130°C после деградации загрязнений.

Таблица 1.4 - Влияние электронно-лучевой обработки на физико-химическое состояние материала в поверхностных слоях и свойства лопаток КВД из стали ЭП866Ш [25]

Состояние лопаток	W, Дж/см <sup>2</sup>	Ra, мкм ± 0,01	HV (при F=1Н) ± 30	$\sigma_{-1}$ (при 600°C, частота нагружения 3000 Гц на базе $2 \cdot 10^7$ циклов), МПа ± 20	h <sub>0</sub> (после 600 часов термоэкспозиции на воздухе при 600°C), мкм ± 5	$\Delta m$ (после 200 циклов нагрева до 600°C и охлаждения в морской воде до 20°C), мг/мм <sup>2</sup> ± 0,03
Исходное	-	0,24	410	380	45	+ 1,98
После эксплуатации	-	1,25	690	290	65	-
После эксплуатации и обработки СИЭП	20-22 (кол-во импульсов - 2)	0,32	470	310	50	+ 2,12
После эксплуатации и обработки СИЭП и отжига 670 °С в течение 6 ч.	50-55 (кол-во импульсов - 4) 20-22 (кол-во импульсов - 2)	0,22	430	420	15	+ 0,38
После ремонта по серийной технологии	-	0,25	400	360	45	+ 2,01

### Заключение по разделу

Аналитический обзор литературы показал, что основные работы исследователей направлены на совершенствование технологий промывки и поддержание чистоты проточной части компрессора в течение всего периода эксплуатации ГТД. Периодические промывки являются быстрым, удобным и экономически выгодным способом очистки проточной части, позволяют поддерживать основные характеристики компрессора на уровне формулярных значений и в большинстве случаев позволяют избежать внепланового дорогостоящего ремонта с остановкой агрегата. Очистка жидкими моющими средствами или водой является более предпочтительной, чем очистка твердотельными очистителями, которая может вызывать эрозию рабочих лопаток компрессора. Однако стоит отметить, что перед осуществлением промывок с использованием жидких моющих средств, следует проводить испытания на коррозионную агрессивность, с целью исследования влияния применяемых жидкостей на состояние очищаемой детали или материала.

Экспериментальные данные по влиянию on/off-line технологий очистки на свойства материала, а также данные по качеству (эффективности) очистки в рассмотренных работах не представлены.

Анализируя литературные источники можно сказать, что в настоящее время представлено достаточное количество способов удаления загрязнений, в том числе углеродсодержащих, с поверхности различных деталей и материалов в заводских условиях. Каждый из представленных способов обладает определенным рядом преимуществ и недостатков.

Для очистки деталей ГТД от углеродсодержащих загрязнений серийно применяются химические технологии, струйно-абразивная обработка с большой долей использования ручного труда.

Наиболее перспективными способами очистки деталей ГТД от углеродсодержащих загрязнений при заводском ремонте можно считать

лазерную очистку, технологию с применением СИЭП, а также струйные методы очистки, такие как криогенный бластинг и АГД-очистка.

В большинстве рассмотренных литературных источников не приводятся данные по эффективности очистки деталей, материалов с применением той или иной технологии удаления углеродсодержащих загрязнений, отсутствуют экспериментальные данные по исследованию влияния технологии очистки на работоспособность деталей или критически важные свойства материалов, применяющихся для изготовления деталей проточной части компрессора ГТД, например, для лопаток: прочность, микротвердость, шероховатость. Исключение составляет лишь работа специалистов завода МПП им. В.В. Чернышева по технологии с применением СИЭП, где необходимые исследования проведены в полном объёме.

Также необходимо отметить, что в представленных работах количественно не оценивается возможность проведения последующих операций с очищенной детали без дополнительных промежуточных обработок, например, возможность проведения пайки или нанесения покрытий сразу после процесса очистки.

Учитывая распространённость титановых сплавов в современных ГТД, а именно достаточно широкое их применения для изготовления деталей проточной части компрессора, которые наиболее подвержены образованию углеродсодержащих загрязнений, а также учитывая, что большинство заводов и ремонтных предприятий обладают необходимым оборудованием для проведения химической обработки, то рациональными и перспективными можно считать прикладные исследования, направленные на поиск химических технологий удаления эксплуатационных загрязнений, которые позволили бы проводить 100% высокоэффективную очистку поверхности деталей и узлов ГТД из титановых сплавов без повреждения поверхности и снижения их основных свойств в минимально короткие сроки без значительной доли ручного труда.

Исходя из вышесказанного, может быть сформирована цель и задачи, которые необходимо решить для ее достижения:

**Цель работы** - оценка влияния химических технологий очистки углеродсодержащих загрязнений на физико-механические свойства образцов титанового сплава BT20 и разработка на этой основе рекомендаций по их удалению с поверхности деталей ГТД при ремонтно-восстановительных мероприятиях.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследовать эффективность очистки поверхности титанового сплава BT20 от углеродсодержащих загрязнений растворами отечественного и зарубежного производства;

2. Исследовать влияние воздействия химических растворов на структуру и свойства поверхности титанового сплава BT20 после удаления углеродсодержащих загрязнений;

3. Изучить возможность ремонта деталей ГТД из титанового сплава BT20 методом пайки после удаления углеродсодержащих загрязнений химическим способом;

4. Исследовать влияние технологий химического удаления углеродсодержащих загрязнений на механические свойства и характер разрушения титанового сплава BT20;

5. Разработать рекомендации по технологии химической очистки углеродсодержащих загрязнений с поверхности деталей ГТД из титановых сплавов.

## 2 Объекты и методы исследования

### 2.1 Жаропрочный титановый сплав ВТ20

Для исследований был выбран жаропрочный титановый сплав ВТ20, как наиболее широко распространённый сплав, применяемый для изготовления узлов и деталей компрессоров ГТД различного назначения.

Данный псевдо  $\alpha$ -сплав принадлежит к системе Ti-Al-Zr-Mo-V (таблица 2.1). Довольно высокое содержание алюминия обеспечивает значительную прочность и жаропрочность этого сплава. Легирование цирконием, молибденом и ванадием также позволяет повысить прочность сплава.

Таблица 2.1 - Химический состав титанового сплава ВТ20

Химический элемент	Fe	C	Si	Mo	V	N	Ti	Al	Zr	O	H
Массовая доля элемента, %	до 0,3	до 0,1	до 0,15	0,5 - 2	0,8 - 2,5	до 0,05	84,9 - 91,7	5,5 - 7	1,5 - 2,5	до 0,15	до 0,012

Сплав ВТ20 является конструкционным сплавом с повышенной прочностью (таблица 2.2) и применяется для изготовления обшивок крыла, лопаток, дисков, корпусов и других деталей КНД и КВД, а также сварных узлов, длительно работающих при температурах от -70 до 450°C (6000 ч) - 500°C (3000 ч).

Сплав ВТ20 может свариваться с титановыми сплавами ВТЗ-1, ОТ4, ОТ4-1, ВТ5-1, ВТ6, ВТ14, ВТ5Л, ВТ21Л. Данный сплав поставляется также в виде фасонного литья под маркой ВТ20Л.

Для проведения исследований был выбран промышленный листовой полуфабрикат из указанного титанового сплава толщиной 2 мм, полученный в условиях ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (рисунок 2.1).

Таблица 2.2 - Механические свойства титанового сплава BT20

Температура испытаний, °С	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
20	930÷1080	830÷980	7÷10	25÷40
350	690÷810	590÷640	7÷9	40÷50
500	540÷590	540÷590	5÷8	40÷55

Примечание: приведены минимальные и максимальные значения.



Рисунок 2.1 - Листовой полуфабрикат из жаропрочного титанового сплава BT20

## 2.2 Химические технологии очистки углеродсодержащих загрязнений

В качестве химических технологий очистки образцов и деталей титановых сплавов от углеродсодержащих загрязнений были отобраны наиболее перспективные и широко распространённые моющие средства и растворы:

1) Очищающий раствор на водной основе ОР1 по ПИ 1.2.118 (РФ), предназначен для очистки деталей проточной части компрессора ГТД от



загрязнений, образующихся в процессе эксплуатации. Состав раствора: синтанол, топливо ТС-1, жидкое стекло, тринатрийфосфат, трилон Б и вода.

Образцы обрабатывали методом погружения. Режим обработки: температура раствора 50-60°C, продолжительность 2 ч.

2) Двухстадийная очистка в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление») (РФ), предназначена для очистки деталей проточной части компрессора ГТД от загрязнений, образующихся в процессе эксплуатации.

Первая стадия очистки представляет собой разрыхление загрязнений путем обработки в щелочном растворе состава: натр едкий, сода кальцинированная, калия перманганат, натрий фтористый и вода.

Образцы погружали в указанный раствор, предварительно нагретый до температуры 110°C. Продолжительность обработки 50 минут.

Вторая стадия очистки представляет собой удаление загрязнений в кислотном растворе состава: серная кислота, натрий хлористый, уротропин, синтанол и вода.

Образцы погружали в указанный раствор, предварительно нагретый до температуры 70-80°C. Продолжительность обработки 1-2 минуты.

3) Концентрат моющего раствора TSP-3030 (РФ) предназначен для off/on-line промывок осевых компрессоров. Продукт специально разработан для удаления всех известных видов загрязнений ГТУ, где отложения обычно образуют плотную смесь различных солей, а также городских и промышленных загрязняющих веществ, углеводов, и прочих углеродосодержащих материалов. Данный концентрат моющего раствора представляет собой уникальную смесь неионосодержащих ПАВ и эмульгаторов, растворенных в биологически разлагающейся системе на водной основе.

С использованием концентрата данного моющего раствора приготавливали водный раствор необходимой концентрации. Образцы

обрабатывали методом погружения. Режим обработки : температура раствора 60°C, продолжительность 1 ч.

4) Концентрат моющего раствора TSP-5050 (РФ) на основе растворителя предназначен для off/on-line промывок осевых компрессоров. Продукт предназначен для удаления консистентной смазки, масла, сажи и других отложений, которые обычно образуются в компрессоре ГТУ. Данный концентрат моющего раствора представляет собой смесь органических растворителей, ПАВ и эмульгаторов.

С использованием концентрата данного моющего раствора приготавливали водный раствор необходимой концентрации. Образцы обрабатывали методом погружения. Режим обработки : температура раствора 60°C, продолжительность 1 ч.

5) Очиститель ZOK-27 производства фирмы ZOK (США, Великобритания) предназначен для промывки проточной части компрессоров газотурбинных авиационных, наземных и морских двигательных установок без их демонтажа, а также промывки деталей и отдельных узлов при ремонте от органических (нефтепродукты, масла, гидрокарбонаты) и неорганических загрязнений (соли и земли). В состав очистителя входят неионизированные поверхностно-активные добавки, замедлители коррозии, органические растворители, деминерализованная вода.

С использованием концентрата данного очистителя приготавливали водный раствор необходимой концентрации (1:4). Образцы обрабатывали методом погружения. Режим обработки: температура раствора 60°C, продолжительность 1 ч.

6) Очиститель See Vee EPC-1 (рисунок 2.2) производства фирмы McGeap (Великобритания) предназначен для промывки проточной части авиационных двигателей и промышленных газоперегонных установок (станций) различного назначения от нефтепродуктов, масел, солей и твердых отходов с лопастей турбины, направляющих лопаток и роторов.

С использованием концентрата данного очистителя приготавливали водный раствор необходимой концентрации (1:4). Образцы обрабатывали методом погружения. Режим обработки: температура раствора 60°C, продолжительность 1 ч.



Рисунок 2.2- Концентрат очистителя Cee Bee EPC-1

7) Щелочной очиститель HDL 202 производства фирмы Socomore (Канада) предназначен для удаления углеродных отложений, сложных оксидов металлов и осадков, образующихся в процессе работы двигателя. Очиститель представляет собой смесь вязкой жидкости из стойких щелочей и хелатирующих агентов.

С использованием концентрата данного очистителя приготавливали 18 % водный раствор. Образцы обрабатывали методом погружения. Режим обработки: температура раствора 71-88°C, продолжительность от 10 до 30 минут;

8) Кислотный очиститель AP 954 (рисунок 2.3) производства фирмы Socomore (Канада) предназначен для удаления ржавчины с поверхности черных металлов и оксидов, слоя окалины и загрязнений. Очиститель представляет собой раствор фосфорной кислоты, моющих средств и ингибиторов.

С использованием концентрата данного очистителя приготавливали 50 % водный раствор. Образцы обрабатывали методом погружения. Режим обработки: температура раствора 20-25°C, продолжительность 1 ч.

После обработки по указанным выше технологиям образцы промывали в горячей и холодной воде, в том числе с использованием ультразвуковой установки (рисунок 2.4). Далее образцы протирали фильтровальной бумагой и оставляли сушить на воздухе в течение 24 часов.



Рисунок 2.3- Концентрат кислотного очистителя AP 954



Рисунок 2.4 - Ультразвуковая установка «Сапфир»

### 2.3 Методы исследования эффективности очистки и свойств поверхности

Для оценки эффективности очистки и свойств поверхности титанового сплава BT20 после удаления загрязнений выбранными растворами, использовали следующие методы исследования:

1) визуальный метод контроля невооруженным взглядом и с использованием оптического микроскопа Olympus SXZ7 с увеличением  $\times 12-114$  (рисунок 2.5), оптического микроскопа Olympus GX51 с увеличением  $\times 50-1000$  (рисунок 2.6), растрового электронного микроскопа Zeiss EVO MA 10 (рисунок 2.7).

Использование данного метода позволяет определить наличие/отсутствие на поверхности образцов остатков загрязнений, повреждений (растратов) после обработки тем или иным раствором, а также оценить поверхность изломов (характер разрушения) образцов после проведения механических испытаний. На каждый вид обработки осматривали по три образца;



Рисунок 2.5 - Оптический микроскоп Olympus SXZ7



Рисунок 2.6 - Оптический микроскоп Olympus GX51



Рисунок 2.7 - Растровый электронный микроскоп Zeiss EVO MA 10

2) гравиметрический метод, заключающийся во взвешивании образцов с точностью до четвертого знака (в исходном состоянии, после нанесения загрязнений и после очистки) и определении изменения массы образцов.

В комплексе с визуальным методом оценки, гравиметрический метод позволяет делать вывод о степени очистки поверхности и степени воздействия раствора на очищаемый материал.

Взвешивание проводили на аналитических весах Ohaus Discovery DV215CD (рисунок 2.8). Взвешивали по три образца на один вид обработки;



Рисунок 2.8 - Аналитические весы Ohaus Discovery

3) рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) - позволяет с микронным разрешением определить качественный элементный (химический) состав поверхностных слоев в исходном состоянии, после нанесения загрязнений, а также после ее очистки. РСМА проводили на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10, оснащённом энергодисперсионным спектрометром «X-Max» (Oxford Instruments) (рисунок 2.7) с применением калибровки по сертифицированным эталонам. Диапазон регистрируемых элементов для качественного анализа – от Be (атомный номер  $Z=4$ ) до U ( $Z=92$ ). Локальность анализа -  $1 \text{ мкм}^2$ . Глубина анализа – 1 мкм. Анализировали по три образца на каждый вид обработки. С поверхности каждого из образцов получали не менее трех спектрограмм;

4) определение параметров шероховатости поверхности ( $R_a$  и  $R_z$ ) в соответствии с ГОСТ 2789-73. Данный способ позволяет делать заключения об изменении рельефа поверхности после воздействия очищающих растворов. Поскольку титан и его сплавы относятся к поверхностно-чувствительным материалам и, следовательно, величина шероховатости поверхности влияет на уровень усталостных характеристик сплава, то определение указанной характеристики также дает возможность оценить склонность сплава к усталостному разрушению.

Планарную съемку поверхности образцов и измерение шероховатости проводили на 3D оптическом профилометре Plu Neox Sensofar-Tech (рисунок 2.9) с увеличением  $\times 10-150$  (площадь кадра при  $\times 10 - 1,206 \text{ мм}^2$ , разрешение по оси  $z - 0,1 \text{ нм}$ ). Исследовали по три образца на один вид обработки. На каждом образце проводили не менее трех измерений;



Рисунок 2.9 - 3D оптический профилометр Plu Neox Sensofar-Tech

5) определение микротвердости поверхности - позволяет установить возможное образование газонасыщенного слоя в тонких поверхностных слоях и сделать вывод о возможном охрупчивании материала в результате химического воздействия..



Определение микротвердости проводили по методу Виккерса на приборе Emcotest Durascan (рисунок 2.10) при нагрузке 0,981 Н, приложенной в течение 15 с. В качестве индентора применялась четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине, равным  $136^\circ$ . Исследовали по три образца на один вид обработки. На каждом образце проводили не менее трех измерений.

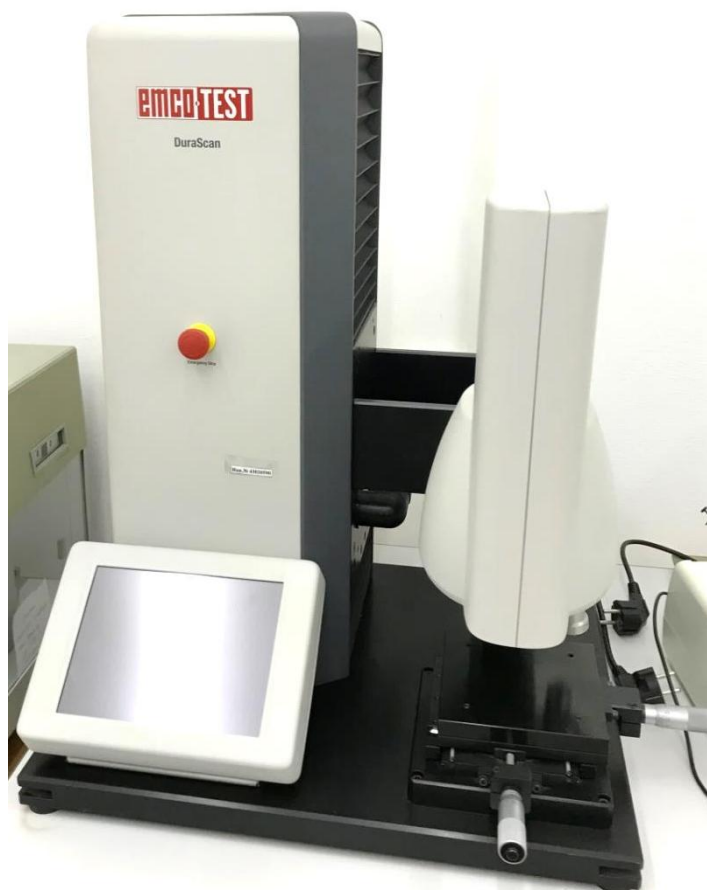


Рисунок 2.10 - Микротвердомер Emcotest Durascan

В процессе ремонта ГТД после удаления эксплуатационных загрязнений на детали могут наноситься защитные покрытия или производиться 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. В работе активность очищенных

поверхностей определяли по величине контактной разности потенциалов с помощью прибора «Поверхность» (рисунок 2.11). Проводили по 5 измерений на каждой из сторон образца.



Рисунок 2.11 - Прибор «Поверхность» для измерения КРП

Для оценки возможности проведения восстановительного ремонта методом пайки деталей из титановых сплавов исследовали технологические характеристики высокотемпературного припоя ВПр16 на поверхности титанового сплава ВТ20, очищенной от углеродсодержащих загрязнений. В соответствии с ГОСТ 23904-79 были определены краевой угол смачивания ( $\theta_{cp}$ ) и площадь растекания припоя. Исследовали по три образца на каждый вид обработки.

Пайку проводили в вакууме. Температура нагрева под пайку составляла 930°C, выдержка при этой температуре - 5 мин. Припой использовали в виде порошка, смешанного с 5 % раствором акриловой смолы в ацетоне. Припой укладывали в виде цилиндра диаметром 5 мм и высотой 3 мм.

## 2.4 Методы исследования механических свойств

Для исследования влияния выбранных технологий очистки на механические свойства титанового сплава ВТ20 при статическом нагружении были проведены испытания на растяжение при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497-84 и при температуре 450°C в соответствии с ГОСТ 9651-84 с определением предела прочности ( $\sigma_B$ ), условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и относительного удлинения ( $\delta$ ). Испытания на растяжение проводили на электромеханической машине Walter+Bai LFM-50 (рисунок 2.12). На каждую температуру и вид обработки испытывали по три образца.



Рисунок 2.12 - Универсальная испытательная машина Walter+Bai LFM-50

Также были проведены испытания на длительную прочность в соответствии с ГОСТ 10145-81 при заданных напряжении 620 МПа и температуре 450°C, по результатам которых было установлено время до разрушения ( $\tau_p$ ) и относительное удлинение ( $\delta$ ) образцов, а также получены кривые ползучести. Испытания проводили на испытательной машине Zwick Карра 50 LA (рисунок 2.13). Испытывали по три образца на каждый вид обработки.

Оценка изменения характеристик длительной и кратковременной прочности позволит определить возможное снижение работоспособности деталей, очищаемых от эксплуатационных загрязнений и дать рекомендации по применению конкретной химической технологии очистки.



Рисунок 2.13 - Испытательная машина Zwick Карра 50 LA

## 2.5 Технология изготовления образцов

В связи с высокой стоимостью и дефицитностью натуральных узлов и деталей ГТД основные исследования проводили на лабораторных образцах. Из листового полуфабриката титанового сплава BT20 толщиной 2 мм были изготовлены образцы-пластины 30x50 мм для оценки эффективности очистки поверхности, металлографических исследований и оценки свойств поверхности, а также стандартные плоские образцы для определения механических свойств.

На часть образцов, по методике разработанной ФГУП «ВИАМ», были нанесены углеродсодержащие загрязнения имитирующие эксплуатационные. Данная методика позволяет в короткие сроки (около 20 часов) получить технологические образцы-эталон, которые могут быть использованы при создании и опробовании технологий очистки деталей от углеродсодержащих загрязнений. Один цикл создания загрязнений включает:

- нанесение на поверхность образцов рабочей среды, путем погружения образцов или деталей в смесь топлива ТС-1 с маслом Б-3В;
- загрузку алундовых тиглей с обработанными образцами в нагретую до 350°C муфельную электропечь (например, Nabertherm L9/11 B180) (рисунок 2.14);
- выдержку тиглей с образцами в нагретой печи в течение 1 ч;
- выгрузку тиглей из печи и извлечение образцов для последующего нанесения рабочей среды.

Общая продолжительность создания такого рода загрязнений не превышает 20 циклов. Однако в случае необходимости получения более толстых слоев загрязнений количество циклов может быть увеличено до 40. В данной работе количество циклов было равно 20. Внешний вид образцов после нанесения данных загрязнений, а также вид поверхности образцов представлен на рисунках 2.15-2.17



Рисунок 2.14 - Муфельная электропечь сопротивления Nabertherm



Рисунок 2.15 - Вид образцов титанового сплава VT20 после нанесения углеродсодержащих загрязнений, имитирующих эксплуатационные

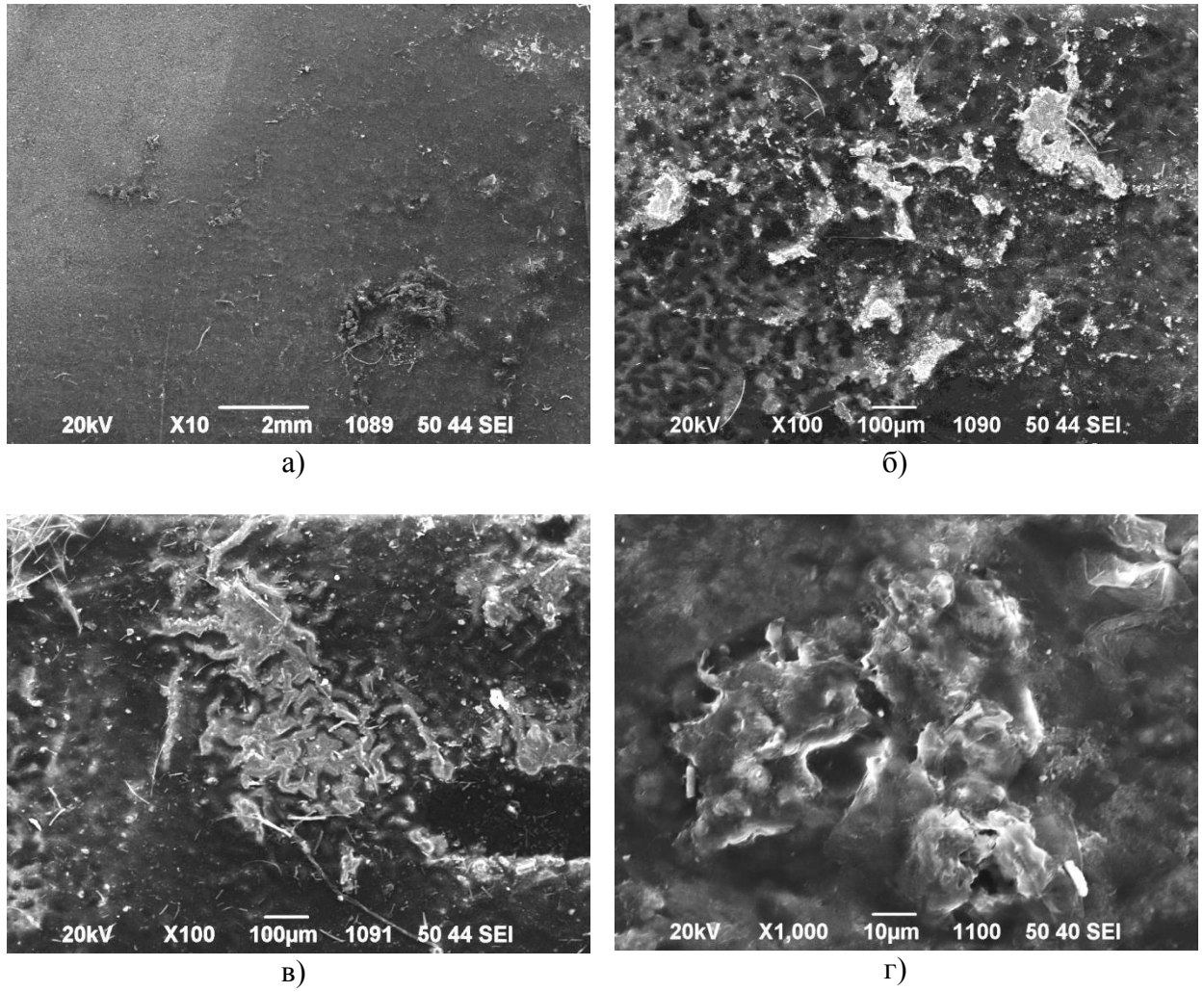


Рисунок 2.16 - Вид углеродсодержащих загрязнений на поверхности титанового сплава BT20 (а-г)



Рисунок 2.17 - Плоские образцы для проведения испытаний на растяжение после нанесения углерод содержащих загрязнений

Поверхность образцов приобрела черный полуматовый цвет. После нанесения загрязнений был проведен рентгеноспектральный микроанализ (спектрограмма представлена на рисунке 2.18) и газовый анализ (результаты представлены в таблице 2.3) поверхности. Газовый анализ проводили на оборудовании фирмы LECO: для определения водорода использовали модель RHEN-602, для определения серы и углерода - модель CS-600, для определения азота и кислорода - модель TC-60.

Спектрограмма, полученная при рентгеноспектральном микроанализе поверхности после нанесения загрязнений хорошо коррелируется с данными представленными в работе [14]: наличие пиков кислорода и углерода высокой интенсивности, а также небольшое количество серы.

Также в работе были использованы две 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, по технологии описанной выше.

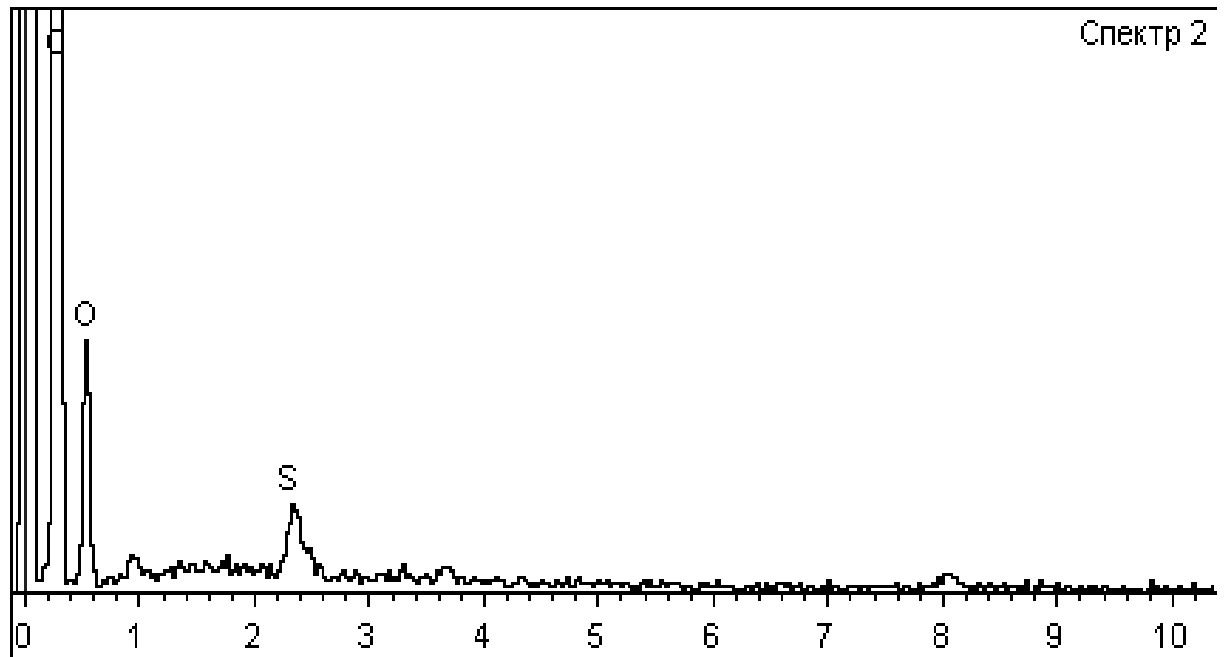


Рисунок 2.18 - Спектрограмма, полученная при РСМА поверхности титанового сплава BT20 после нанесения углеродсодержащих загрязнений

Таблица 2.3 - Результаты газового анализа поверхности образцов титанового сплава BT20 после нанесения углеродсодержащих загрязнений

Химический элемент	C	S	N	O	H
Массовая доля элемента, %	43	2,8	0,38	50	3,6

Примечание: приведены средние значения.

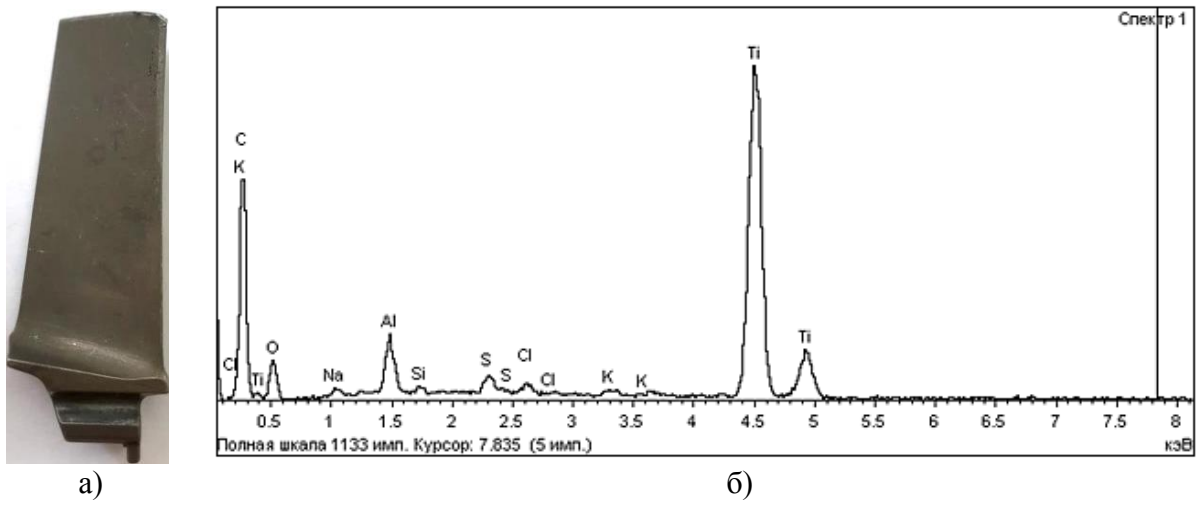


Рисунок 2.19 - Вид компрессорной лопатки ГТД после эксплуатации (лопатка № 1) (а) и спектрограмма (б), полученная РСМА ее поверхности

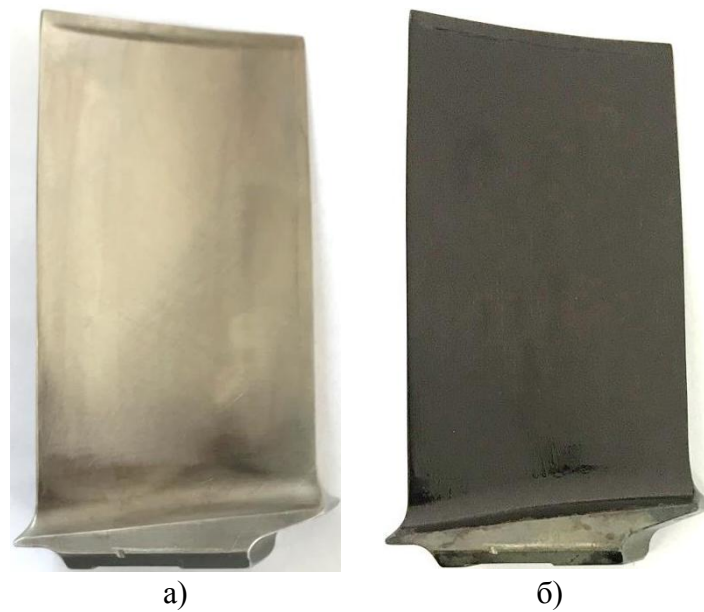


Рисунок 2.20 - Вид компрессорной лопатки ГТД (лопатка № 2): а) в исходном состоянии; б) после нанесения загрязнений

### **3. Исследование влияния химических технологий удаления углеродсодержащих загрязнений на свойства поверхности титанового сплава BT20**

#### **3.1 Оценка эффективности очистки поверхности**

После нанесения загрязнений на образцы титанового сплава BT20 была произведена их очистка путем обработки в очищающем растворе на водной основе OP1, в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление»), в растворе TSP-3030, в растворе TSP-5050, в растворе ZOK-27, в растворе See Vee EPC-1, в растворе HDL 202 и растворе AP 954. Для оценки воздействия моющих растворов на основной материал одновременно проводили обработку исходных образцов (без загрязнений). Предварительную оценку эффективности очистки образцов проводили визуально и гравиметрическим методом. Результаты исследований представлены таблице 3.1. Внешний вид исходных образцов и образцов после удаления загрязнений представлен на рисунках 3.1-3.8.

Результаты визуального осмотра и значения по удельному изменению массы образцов свидетельствуют о том, что обработка в растворе OP1 позволяет полностью удалить загрязнения с титанового сплава BT20 без видимого повреждения поверхности. При обработке исходных образцов (без загрязнений) повреждения поверхности также не наблюдаются, изменения массы отсутствуют.

Обработка образцов с загрязнениями в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление») позволяет полностью удалить загрязнения, но при этом зафиксирована убыль массы основного металла. На поверхности образцов имеются зоны с небольшими растратами окисной пленки. Убыль массы зафиксирована и на исходных образцах.

Таблица 3.1 - Результаты исследования эффективности очистки поверхности титанового сплава ВТ20 от углеродсодержащих загрязнений

Название раствора	Вид образца	Процент неочищенной поверхности %	Удельное изменение массы ( $\Delta m$ ), г/м <sup>2</sup>			Состояние поверхности
			Общая убыль	Убыль загрязнений	Убыль металла	
1	2	3	4	5	6	7
ОР1	исходный	-	-	-	0	Поверхность без изменений
	с загрязнениями	0	14,52	14,52	0	Загрязнения с поверхности удалены полностью. Поверхность покрыта окисной пленкой золотистого цвета. Видимые дефекты или повреждения поверхности отсутствуют (рисунок 3.1б)
«рыхление + травление»	исходный	-	-	-	0,4	Поматование поверхности
	с загрязнениями	0	13,94	13,80	0,14	Загрязнения с поверхности удалены полностью. Поверхность покрыта окисной пленкой золотистого цвета. Имеются зоны с растравом окисной пленки (рисунок 3.2б)
TSP-3030	исходный	-	-	-	0,1	Видимые дефекты или повреждения поверхности отсутствуют
	с загрязнениями	65	-	-	-	Больше половины поверхности образцов покрыта загрязнениями. На очищенных участках видна окисная пленка золотистого цвета (рисунок 3.3б)

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
TSP-5050	исходный	-	-	-	0,1	Видимые дефекты или повреждения поверхности отсутствуют
	с загрязнениями	80	-	-	-	На небольших отдельных участках поверхности загрязнения отсутствуют. На очищенных участках видна окисная пленка золотистого цвета (рисунок 3.4б)
ZOK-27	исходный	-	-	-	0,1	Видимые дефекты или повреждения поверхности отсутствуют
	с загрязнениями	75	-	-	-	На небольших отдельных участках поверхности загрязнения отсутствуют. На очищенных участках видна окисная пленка золотистого цвета (рисунок 3.5б)
Cee Bee EPC-1	исходный	-	-	-	0	Поверхность без изменений
	с загрязнениями	25	-	-	-	Загрязнения удалены не полностью. На очищенных участках видна окисная пленка золотистого цвета (рисунок 3.6б).
HDL 202	исходный	-	-	-	0,53	Поматовение поверхности
	с загрязнениями	0	13,72	13,55	0,17	Загрязнения удалены полностью. Небольшое поматовение поверхности (рисунок 3.7б)

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
AP 954	исходный	-	-	-	0	Поверхность без изменений
	с загрязнениями	25	-	-	-	Загрязнения удалены не полностью. На очищенных участках видна окисная пленка золотистого цвета (рисунок 3.8б)

Примечание: приведены средние значения.

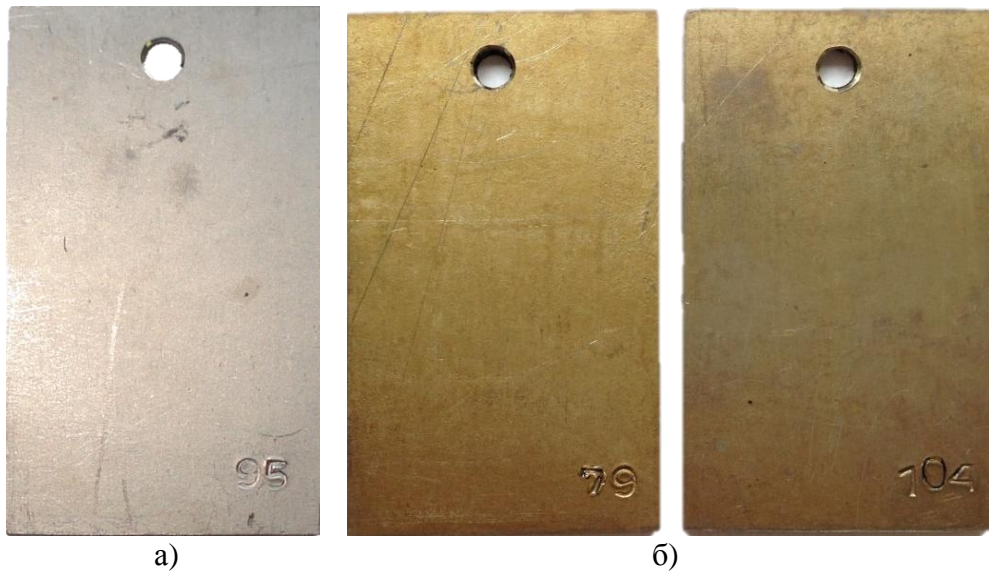


Рисунок 3.1 - Вид образцов титанового сплава BT20: а) исходный; б) после очистки раствором OP1

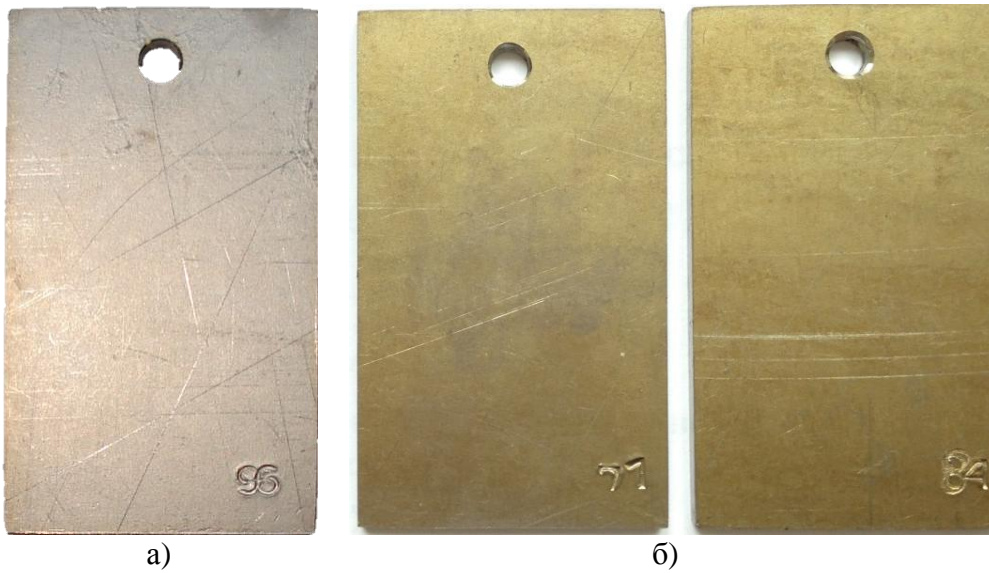


Рисунок 3.2 - Вид образцов титанового сплава BT20: а) исходный; б) после очистки в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление»)

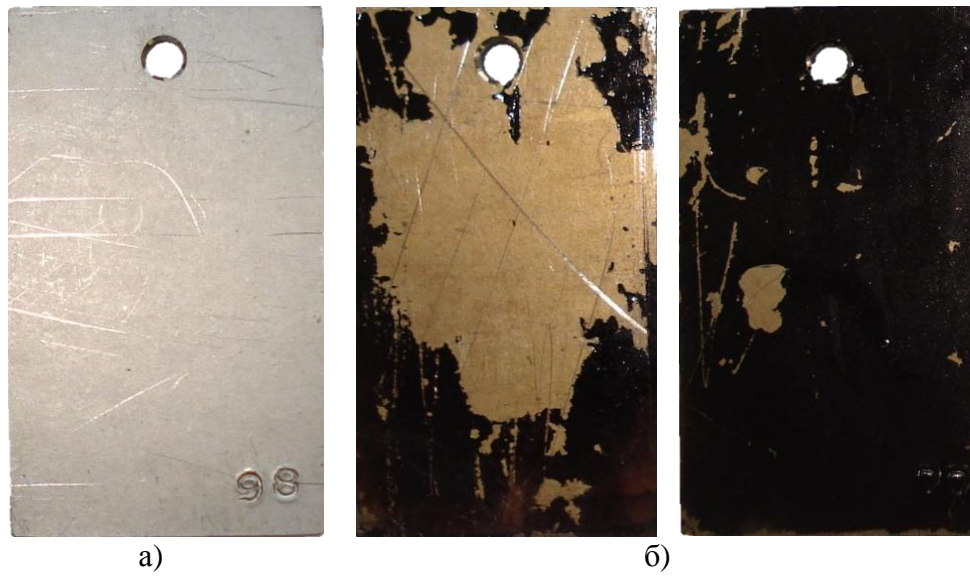


Рисунок 3.3 - Вид образцов титанового сплава BT20: а) исходный; б) после очистки раствором TSP-3030

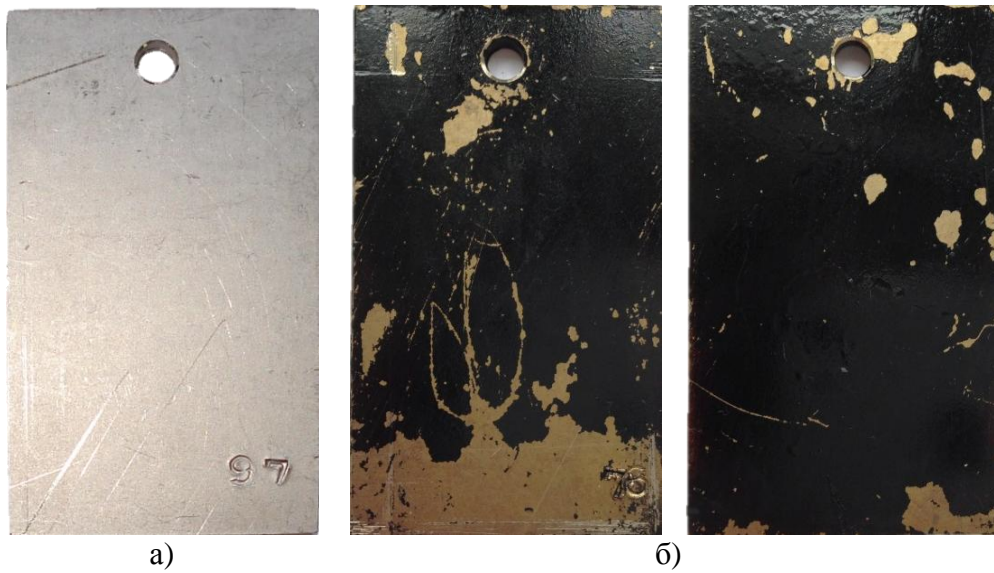


Рисунок 3.4 - Вид образцов титанового сплава BT20: а) исходный; б) после очистки раствором TSP-5050



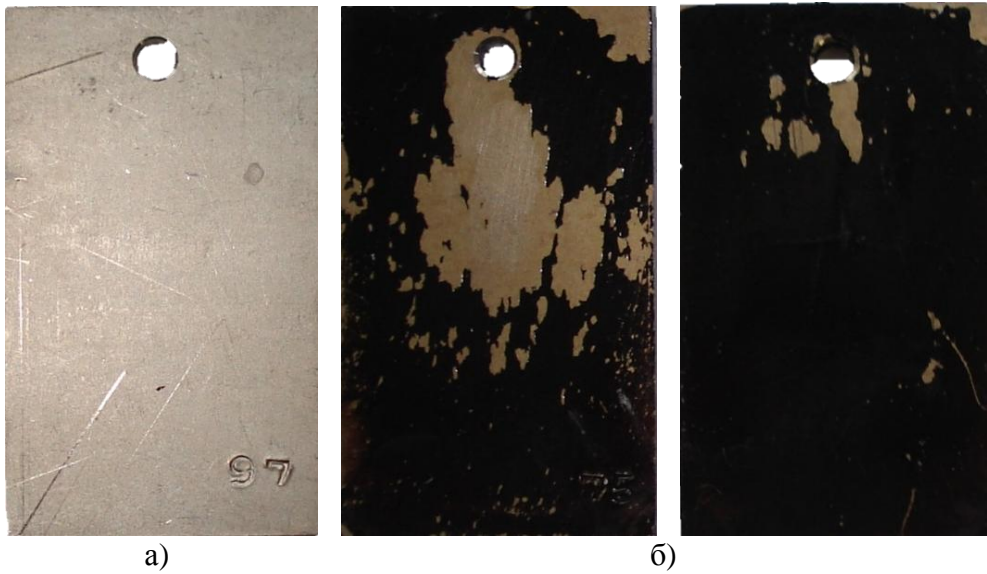


Рисунок 3.5 - Вид образцов титанового сплава BT20: а) исходный; б) образцы после очистки раствором ZOK-27

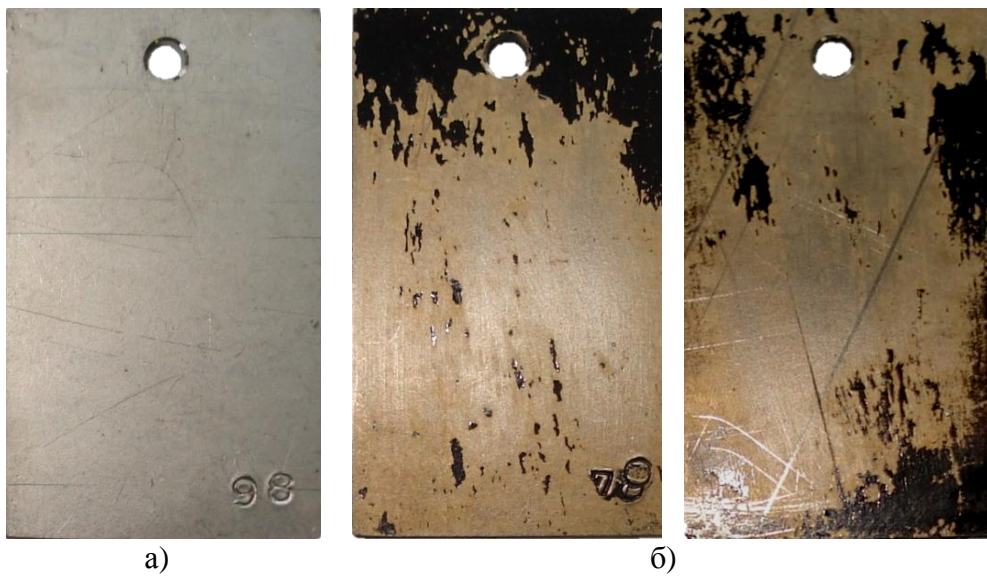


Рисунок 3.6 - Вид образцов титанового сплава BT20: а) исходный; б) после очистки раствором See Bee EPC-1

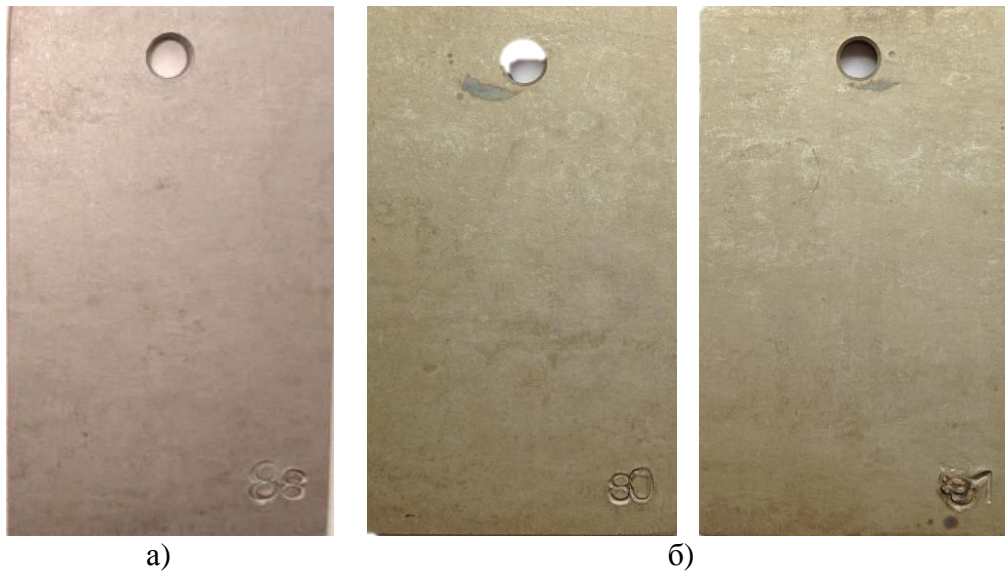


Рисунок 3.7 - Вид образцов титанового сплава BT20: а) исходный; б) после очистки раствором HDL 202

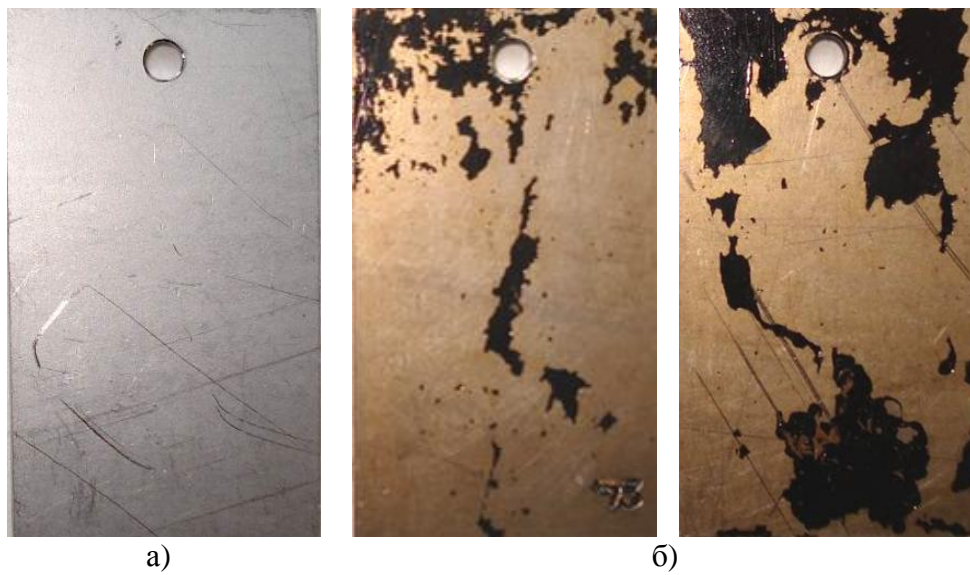


Рисунок 3.8 - Вид образцов титанового сплава BT20: а) исходный; б) после очистки раствором AP 954

Экспериментальные данные показывают, что растворы TSP-5050, TSP-3030, ZOK-27, See Vee EPC-1 оказывают небольшое воздействие на основной материал (убыль 0,1 г/м<sup>2</sup> на исходных образцах), однако ни один из указанных растворов не обеспечивает полного очищения поверхности от загрязнений.

При использовании раствора HDL 202 поверхность полностью очищается от загрязнений, но при этом наблюдается исчезновение блеска и появление матовой поверхности («поматовение» поверхности) и убыль массы основного металла, что свидетельствует о небольшом травлении поверхности. На исходных образцах также наблюдается убыль массы и поматовение поверхности.

Обработка в растворе AP 954 не оказывает воздействия на основной материал, но при этом полного очищения поверхности от загрязнений не происходит.

По результатам предварительных исследований можно заключить, что наилучшую эффективность очистки титанового сплава BT20 показали: очищающий раствор на водной основе OP1, щелочной и кислотный растворы («рыхление + травление») и раствор HDL 202. В связи с этим для дальнейших исследований целесообразно отобрать образцы, очищенные от углеродсодержащих загрязнений с использованием данных растворов.

### **3.2 Металлографический анализ поверхности**

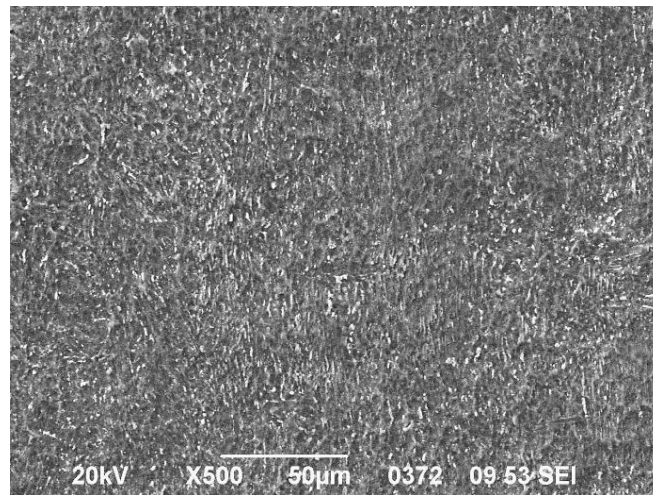
Результаты металлографического анализа, а также РСМА поверхности исходных образцов и образцов после удаления углеродсодержащих загрязнений в растворе OP1, в растворе HDL 202 и щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление») представлены на рисунках 3.9-3.12.

Макроструктура тичного участка поверхности образца после удаления загрязнений в растворе OP1 представлена на рисунке 3.10а, б. Данная технология очистки обеспчивает полное удаление загрязнений с

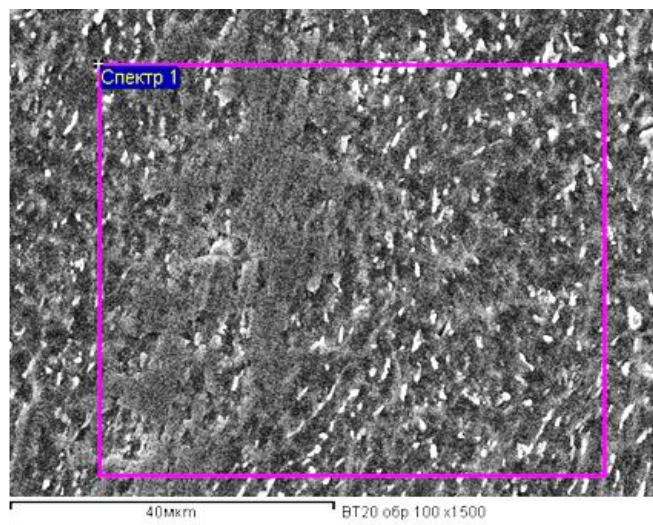
поверхности, что подтверждается данными электронной микроскопии и РСМА. В спектрограмме, полученном с поверхности образцов, присутствуют только элементы, входящие в химический состав сплава (рисунок 3.10в).

Макроструктура тичного участка поверхности образца после удаления углеродсодержащих загрязнений в щелочном и кислотном ратворах («рыхление + травление») представлена на рисунке 3.11а, б. Данная технология также обеспечивает полную очистку поверхности. В спектрограмме присутствуют только элементы, входящие в химический состав сплава (рисунок 3.11в). Макроструктура поверхности без изменений.

Обработка в растворе HDL 202 обеспечивает полную очистку поверхности. Данные электронной микроскопии (рисунок 3.12а, б) и РСМА (рисунок 3.12 в) подтверждают отсутствие остатков загрязнений на поверхности. Однако стоит отметить, что в отличие от удаления загрязнений в ОР1, в щелочном и кислотном ратворах («рыхление + травление»), макроструктура поверхности после удаления загрязнений в растворе HDL 202 (рисунок 3.12б) несколько отличается от макроструктуры поверхности исходного образца, что свидетельсвуют об активном воздействии указанного раствора на основной материал и травлении поверхности.



а), x500



б), x1500

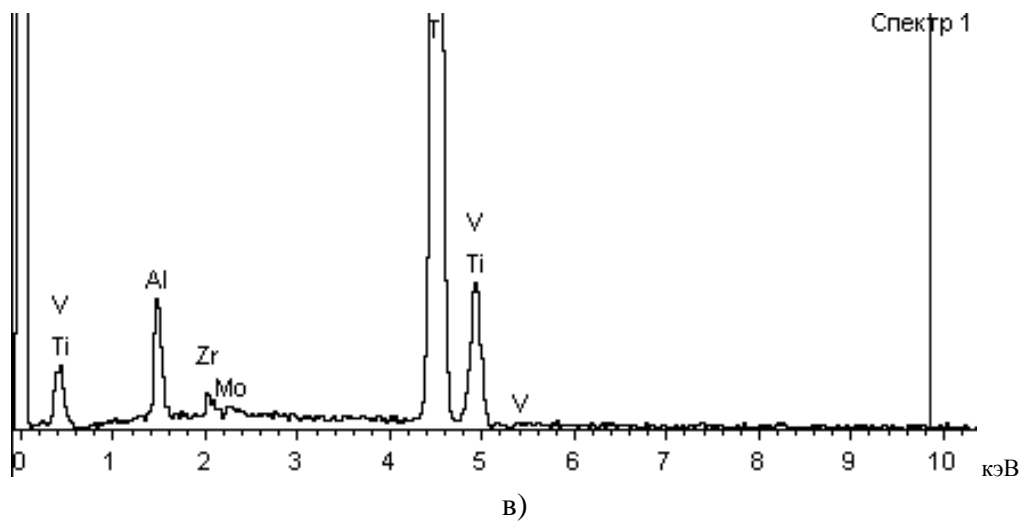
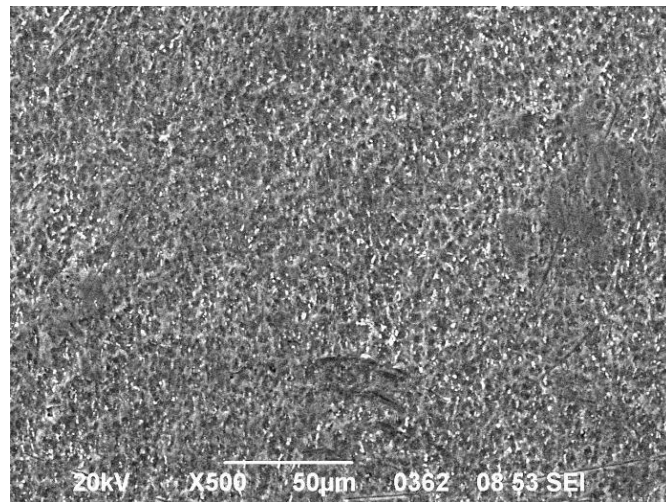
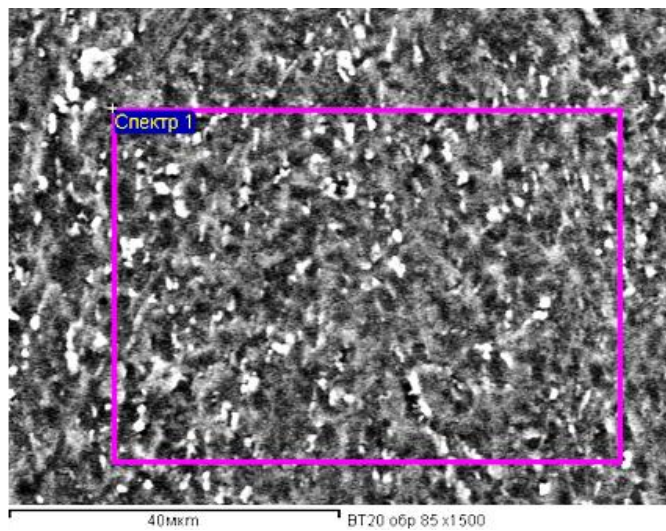


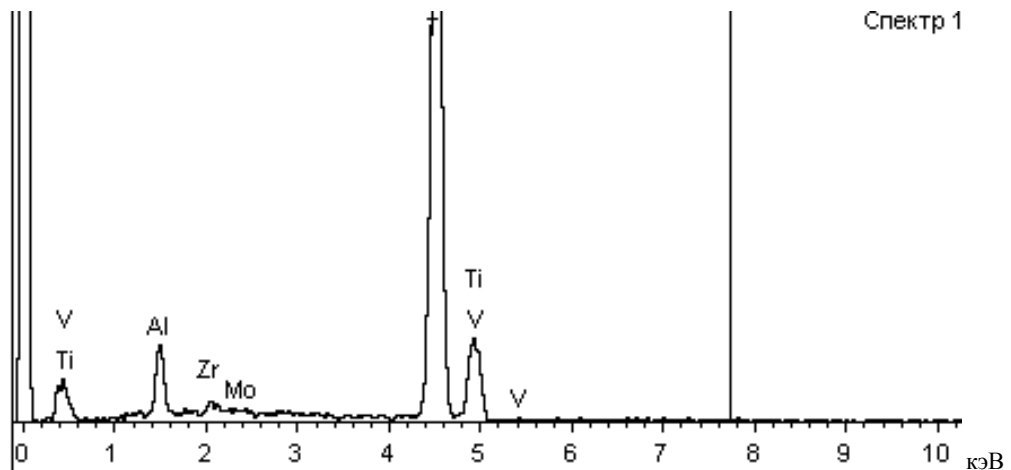
Рисунок 3.9 - Поверхность (а, б) и спектрограмма (в), полученная с типичного участка исходного образца титанового сплава BT20



а), x500

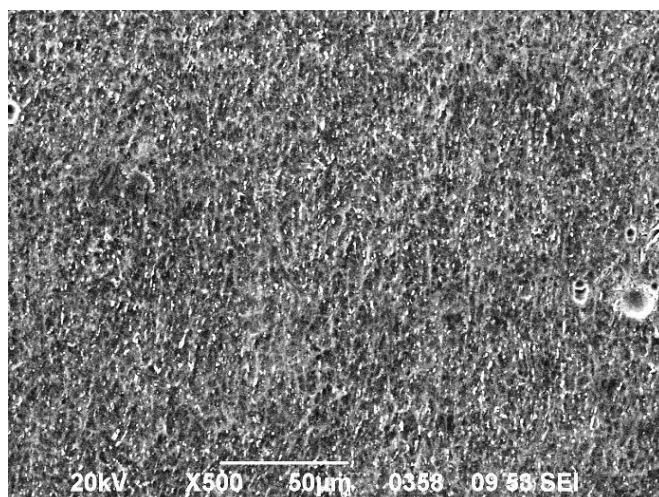


б), x1500

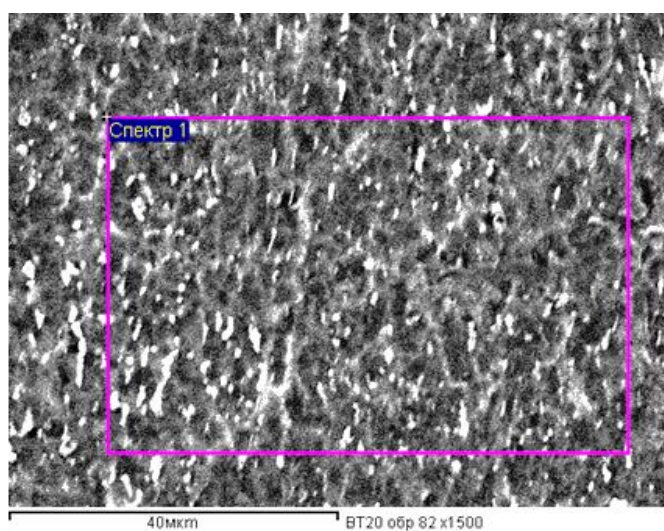


в)

Рисунок 3.10 -Поверхность (а, б) и спектрограмма (в), полученная с типичного участка образца титанового сплава BT20 после удаления загрязнений раствором OP1



а), x500



б), x1500

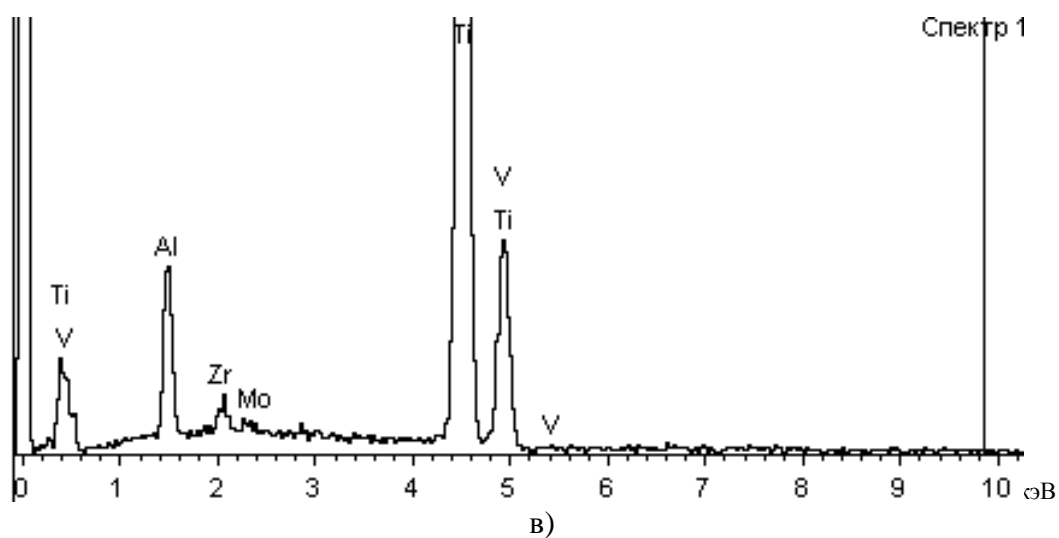
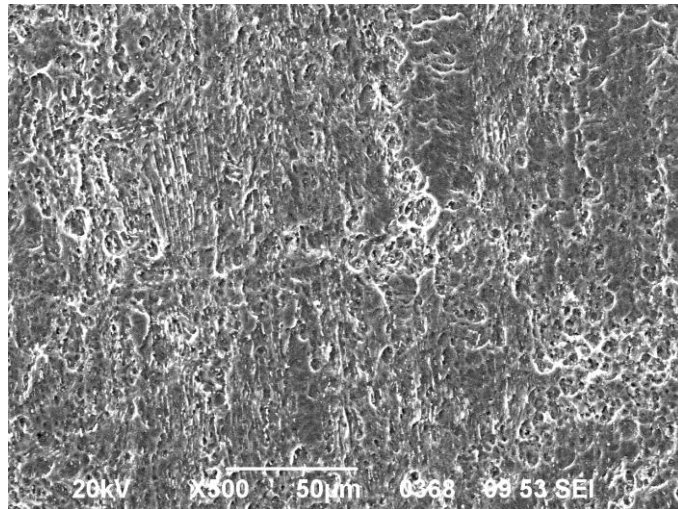
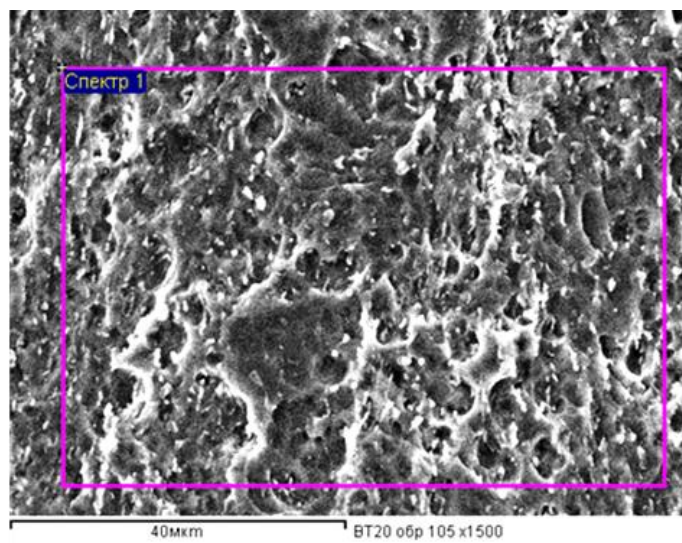


Рисунок 3.11 - Поверхность (а, б) и спектрограмма (в), полученная с типичного участка образца титанового сплава BT20 после удаления загрязнений в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление»)



а), x500



б), x1500

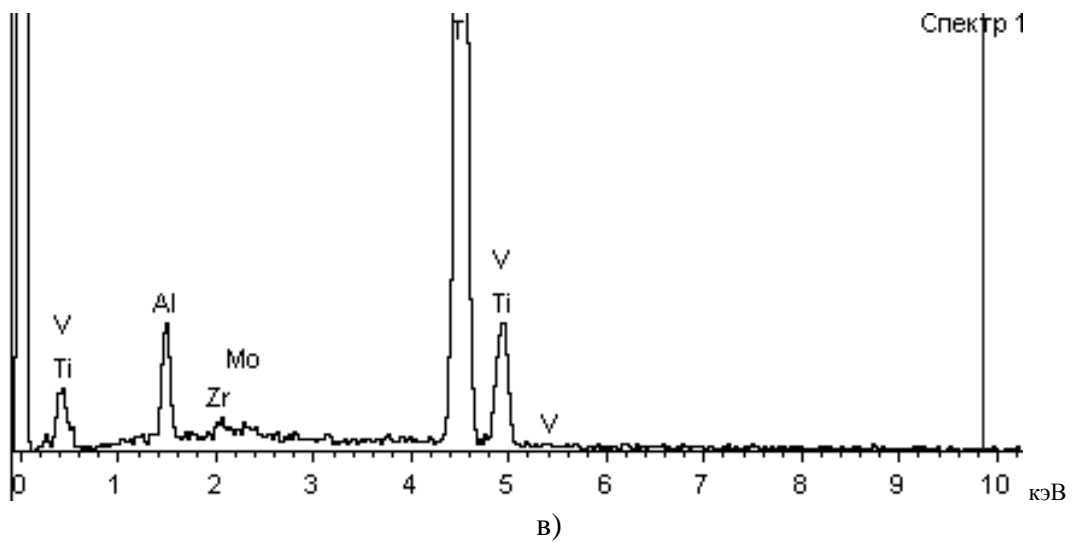


Рисунок 3.12 - Поверхность (а, б) и спектрограмма (в), полученная с типичного участка образца титанового сплава BT20 после удаления загрязнений в растворе HDL 202



### 3.3 Оценка изменения рельефа поверхности

Результаты измерений шероховатости поверхности образцов после удаления загрязнений с использованием раствора OP1, раствора HDL 202, щелочного и кислотного растворов («рыхление + травление») в сравнении с исходным состоянием представлены в таблице 3.2. Профили и 3D-изображения поверхностей в исходном состоянии и после удаления загрязнений представлены на рисунках 3.13-3.16.

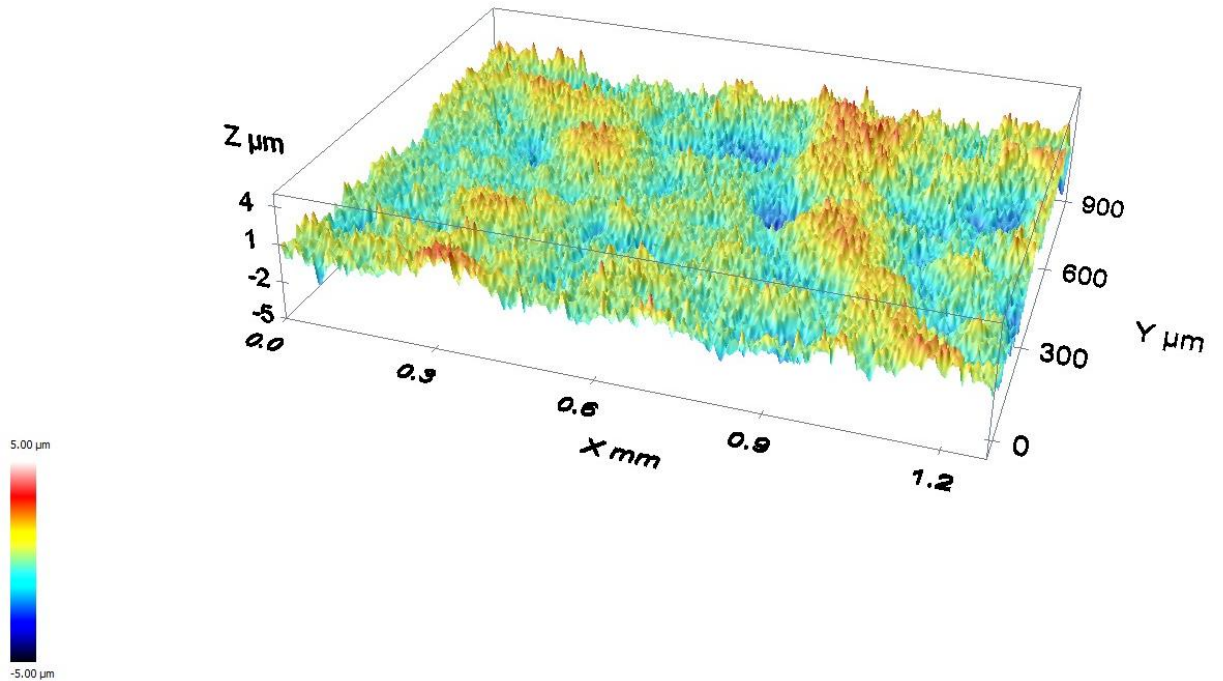
Таблица 3.2 - Шероховатость поверхности образцов титанового сплава BT20 после удаления загрязнений различными растворами

Название раствора	Ra, мкм	Rz, мкм
без обработки (исходное состояние)	0,63÷0,80	6,3÷10
OP1	0,50÷0,80	6,3÷10
«рыхление + травление»	0,63÷0,80	8÷10
HDL 202	0,63÷0,80	8÷10

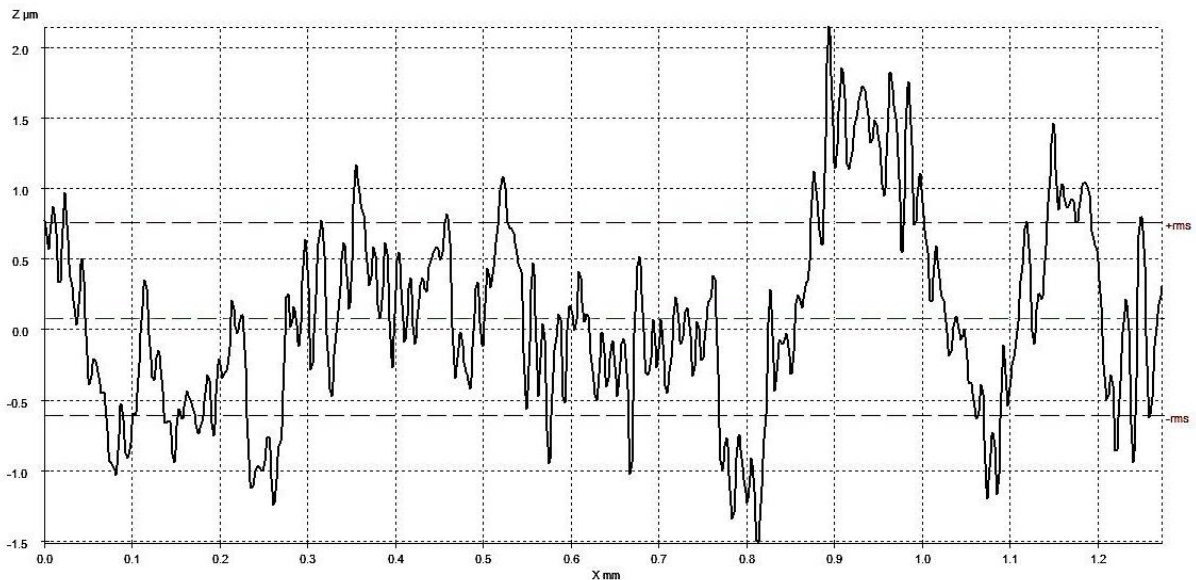
Примечание: приведены максимальные и минимальные значения.

После очистки образцов титанового сплава BT20 от загрязнений с использованием указанных растворов диапазон значений шероховатости поверхности изменяется незначительно. Рельеф и профили очищенных поверхностей имеют вид схожий с поверхностью исходных образцов, без значительных, как локальных, так и обширных углублений (растратов), как правило, характеризующих химически поврежденные поверхности.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что небольшое травление поверхности, которое происходит при удалении загрязнений в растворе HDL 202, идет равномерно по всей поверхности.

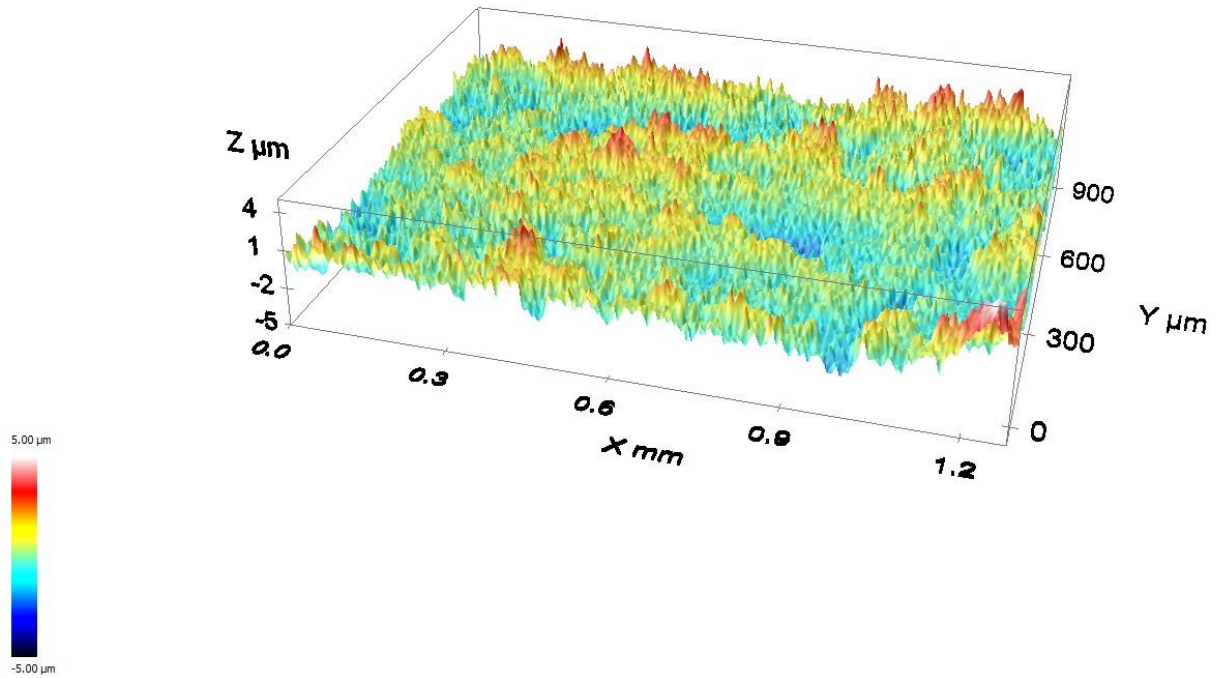


а) x10

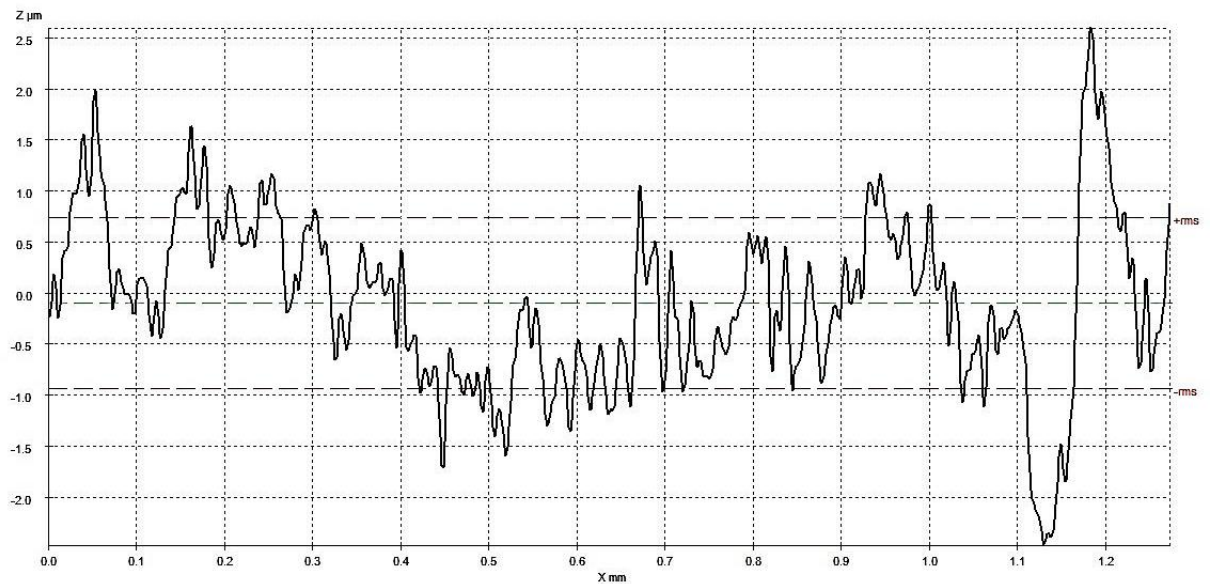


б)

Рисунок 3.13 - Типичный участок поверхности образца титанового сплава VT20:  
а) 3D-изображение; б) профиль

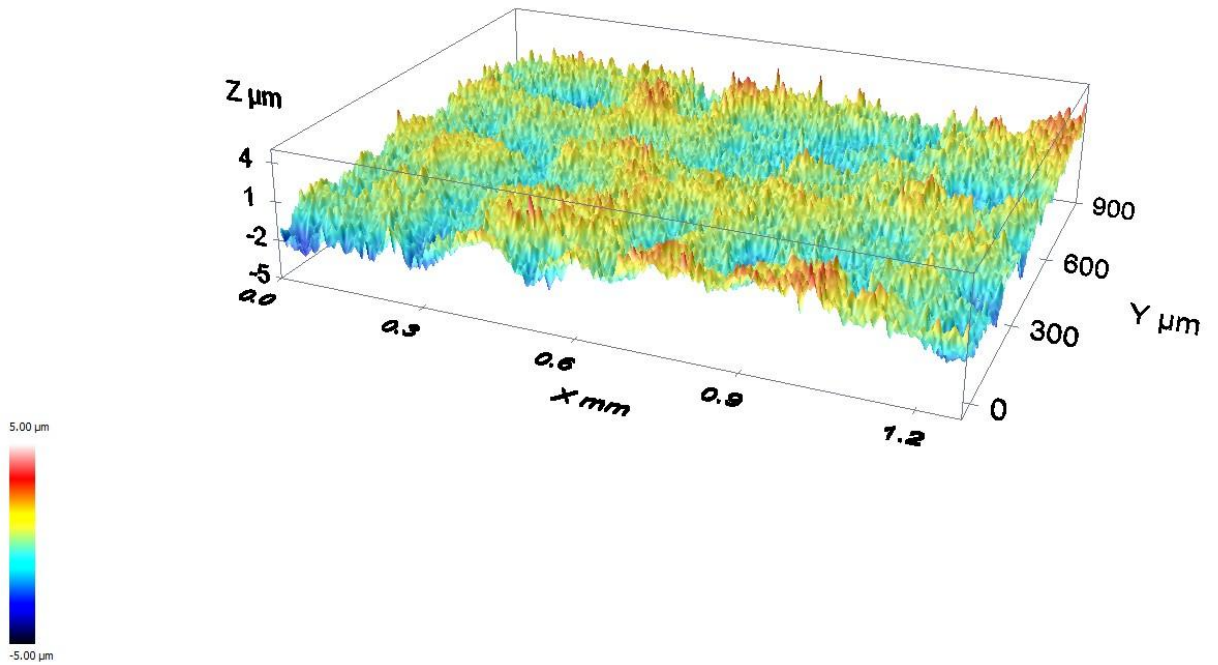


a) x10

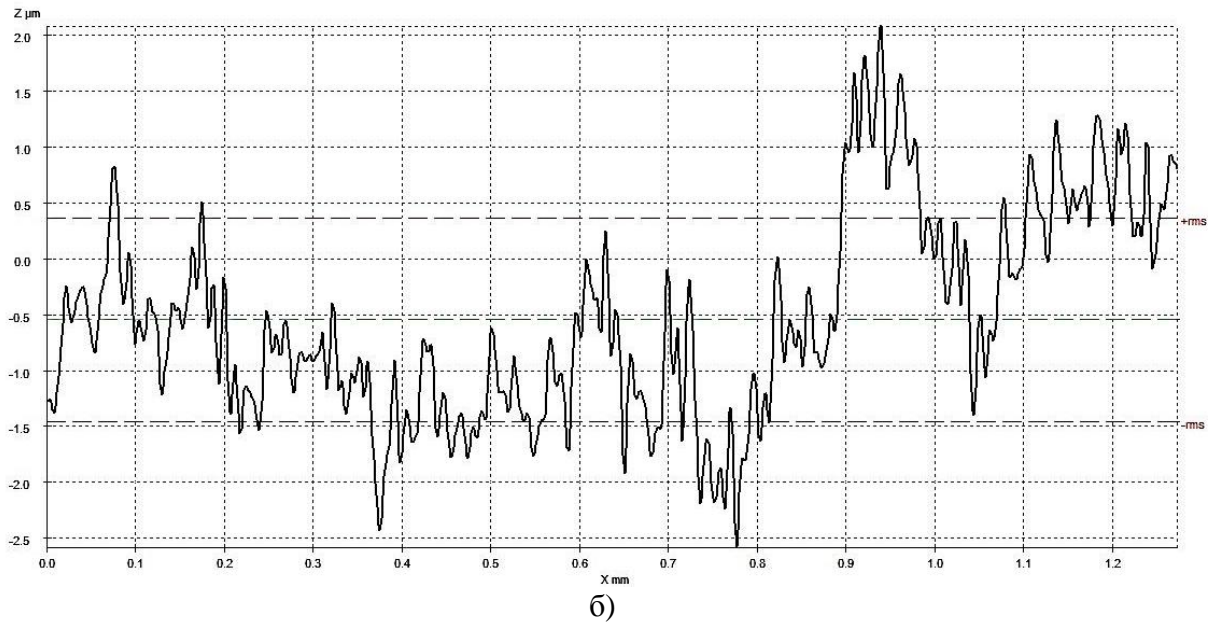


б)

Рисунок 3.14 - Типичный участок поверхности образца титанового сплава BT20 после удаления загрязнений раствором OP1: а) 3D-изображение; б) профиль

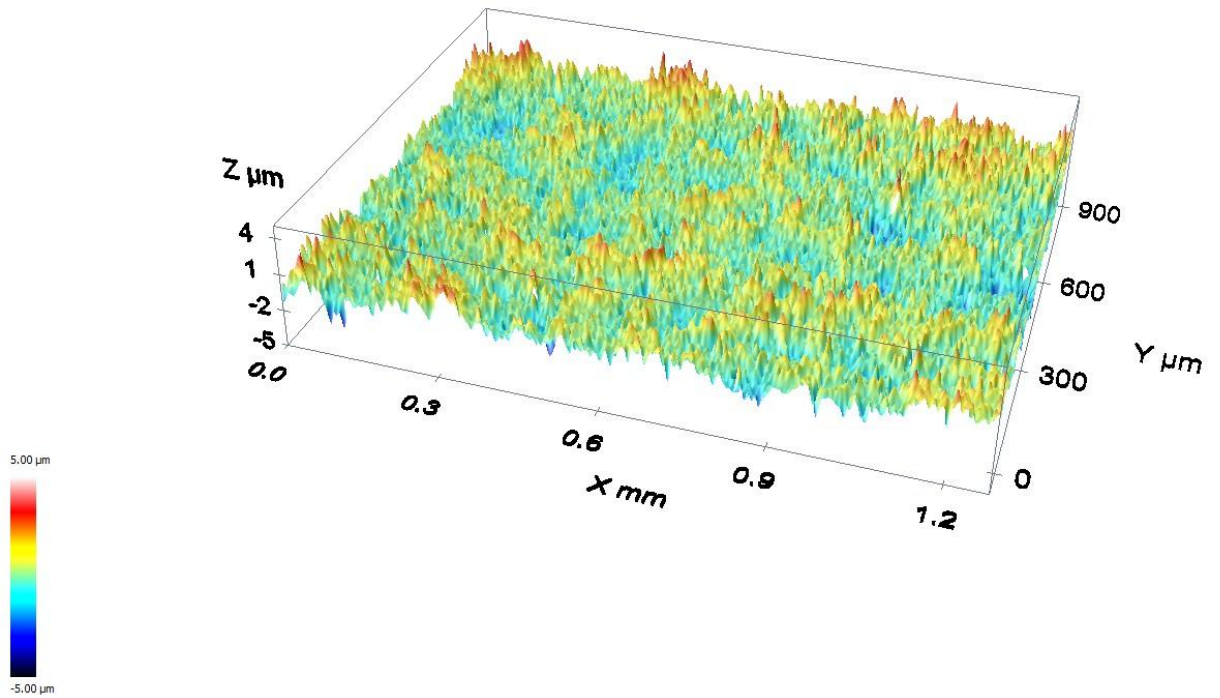


а) x10

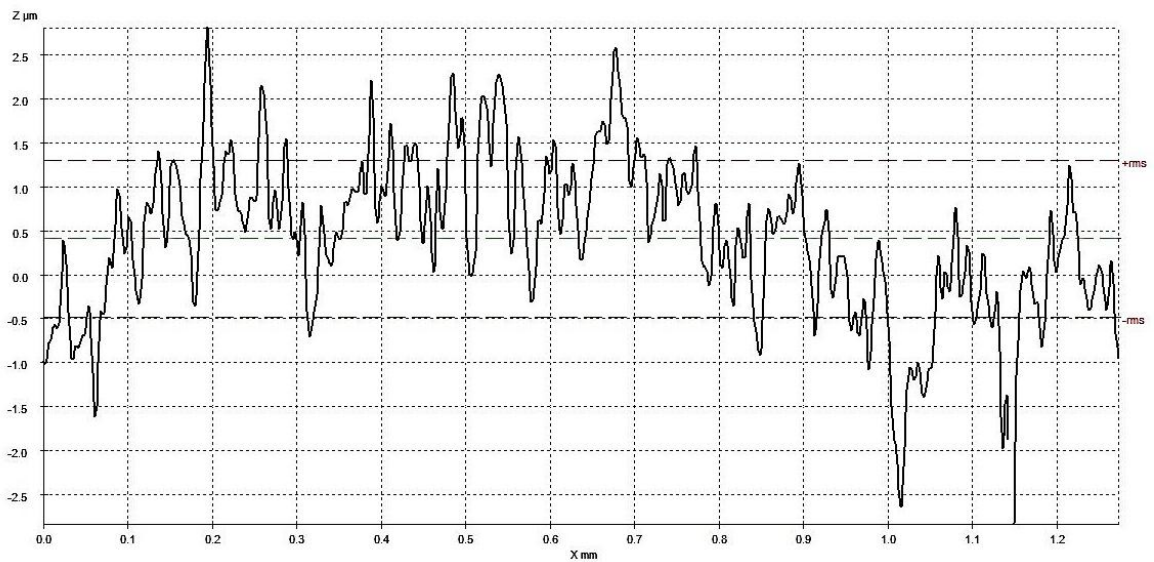


б)

Рисунок 3.15 - Типичный участок поверхности образца титанового сплава ВТ20 после удаления загрязнений в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление»):  
а) 3D-изображение; б) профиль



а) x10



б)

Рисунок 3.16 - Типичный участок поверхности образца титанового сплава BT20 после удаления загрязнений в растворе HDL 202: а) 3D-изображение; б) профиль

### 3.4 Оценка изменения активности поверхности

Результаты измерений активности поверхности (таблица 3.3) свидетельствуют о том, что вне зависимости от технологии очистки загрязнений происходит снижение значений поверхностного потенциала на 24% при обработке раствором ОР1 и на 47 и 54% при использовании щелочного и кислотного растворов («рыхление + травление») и раствора HDL 202 соответственно. Таким образом удаление загрязнений с использованием очищающего раствора на водной основе ОР1 обеспечивает наиболее близкое значение поверхностного потенциала к исходному состоянию.

Также следует отметить, что значения поверхностного потенциала полученные при применении раствора ОР1 достаточно хорошо соотносятся с рекомендациями патента [64], в котором указывается, что для титановых сплавов КРП должна быть не ниже 0,24 В.

Таблица 3.3 - Активность поверхности образцов титанового сплава ВТ20 после удаления загрязнений различными растворами

Название раствора	Потенциал поверхности, В
без обработки (исходное состояние)	$\frac{0,28 \div 0,34}{0,30}$
ОР1	$\frac{0,18 \div 0,28}{0,23}$
«рыхление + травление»	$\frac{0,12 \div 0,20}{0,16}$
HDL 202	$\frac{0,11 \div 0,23}{0,14}$

Примечание: в числителе приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе - среднее.

### 3.5 Оценка изменения микротвердости поверхности

Данные по измерению микротвердости поверхности после удаления загрязнений приведены в таблице 3.4. Полученные результаты показывают, что средние значения микротвердости образцов, очищенных с использованием раствора OP1 и раствора HDL 202, незначительно (до 5%) превышают таковые для исходных образцов. Микротвердость образцов, очищенных в щелочном и кислотном растворах («рыхление + травление») не изменяется.

Таблица 3.4 - Микротвердость поверхности образцов титанового сплава BT20 после удаления загрязнений различными растворами

Название раствора	HV
без обработки (исходное состояние)	$\frac{376 \div 397}{386}$
OP1	$\frac{374 \div 446}{404}$
«рыхление + травление»	$\frac{372 \div 408}{386}$
HDL 202	$\frac{380 \div 426}{400}$

Примечание: в числителе приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе - среднее.

#### 4 Исследование технологических характеристик припоя ВПр16 применительно к титановому сплаву ВТ20

В процессе ремонта некоторых узлов ГТД после удаления эксплуатационных загрязнений может производиться пайка с целью восстановления геометрии детали. При проведении процессов пайки деталей важными технологическими характеристиками является краевой угол смачивания и площадь растекания припоев.

С целью оценки возможности применения припоя ВПр16 при пайке деталей, очищенных от углеродсодержащих загрязнений химическим способом, были исследованы технологические характеристики данного припоя применительно к титановому сплаву ВТ20. Результаты исследований представлены в таблице 3.5.

Полученные данные показывают, что раствор ОР1, раствор HDL 202, щелочной и кислотный растворы («рыхление + травление») обеспечивают примерно одинаковые значения по площади растекания и краевому углу смачивания припоя ВПр16 и находятся на уровне, характерном для поверхности исходных образцов.

Таблица 3.5 - Технологические характеристики припоя ВПр16 на поверхности титанового сплава ВТ20, очищенной от загрязнений различными растворами

Название раствора	Площадь растекания, мм <sup>2</sup>	Краевой угол смачивания $\theta_{\text{ср}}$ , °
без обработки (исходное состояние)	81÷83	10÷11
ОР1	81÷87	10÷11
«рыхление + травление»	78÷84	10÷11
HDL 202	80÷81	10÷11

Примечание: приведены минимальные и максимальные значения.



## 5 Исследование изменения механических свойств титанового сплава ВТ20 после химического удаления углеродсодержащих загрязнений

### 5.1 Прочность и пластичность образцов в условиях кратковременного статического нагружения

С целью исследования влияния процессов образования и удаления углеродсодержащих загрязнений на прочность и пластичность титанового сплава ВТ20 были проведены испытания на растяжение данного сплава при комнатной температуре (таблица 3.6) и рабочей температуре (450°C) (таблица 3.7).

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. Изменения по каждому показателю не превышают 1-2 %. Все полученные значения находятся в пределах паспортных характеристик сплава.

Таблица 3.6 - Результаты испытаний на растяжение образцов титанового сплава ВТ20 (при температуре 20°C) после удаления загрязнений различными растворами

Название раствора	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
1	2	3	4
без обработки (исходное состояние)	1070	870	11,5
с загрязнениями	1070	860	10
ОР1	1070	880	11

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4
«рыхление + травление»	1080	870	10
HDL 202	1070	870	10,5
по паспорту	$\geq 930$	$\geq 830$	$\geq 7$

Примечание: приведены средние значения.

Таблица 3.7 - Результаты испытаний на растяжение образцов титанового сплава ВТ20 (при температуре 450°C) после удаления загрязнений различными растворами

Название раствора	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
без обработки (исходное состояние)	790	620	8
с загрязнениями	790	600	8
OP1	790	590	8
«рыхление + травление»	790	590	8
HDL 202	790	620	8
по паспорту	$\geq 590$	$\geq 540$	$\geq 6$

Примечание: приведены средние значения

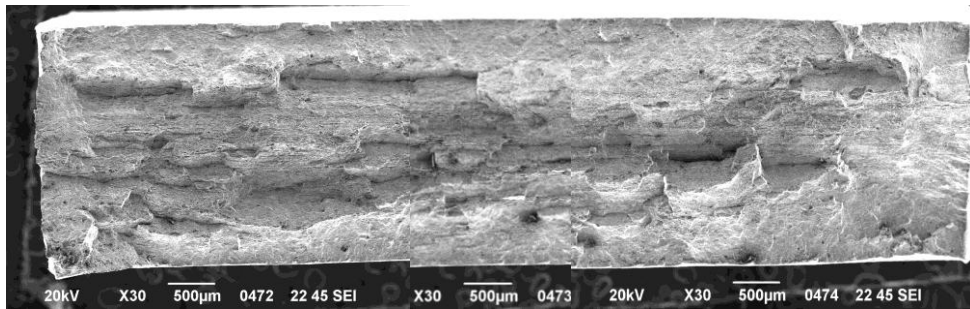
## 5.2 Оценка характера разрушения образцов после испытаний на растяжение

Несмотря на незначительные изменения предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения были проведены фрактографические исследования изломов образцов титанового сплава ВТ20

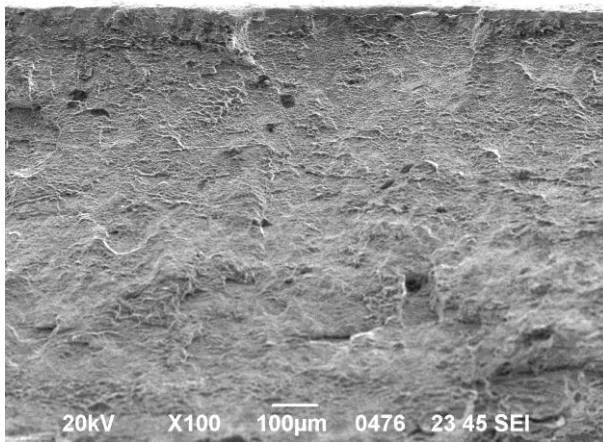
после испытаний на растяжение с целью установления характера разрушения и возможного его изменения, связанного с химической обработкой.

Различия в микростроении изломов исходных образцов (без обработки), образцов с загрязнениями и образцов очищенных от загрязнений с использованием раствора ОР1, щелочного и кислотного растворов («рыхление + травление») и раствора HDL 202 не выявлены (рисунок 3.17 - 3.26). При малых увеличениях на изломах образцов наблюдается структурно-зависимый характер разрушения, как на исходных, так и на очищенных образцах, а также на образцах с загрязнениями (рисунок 3.17а - 3.26а). При больших увеличениях поверхность разрушения представлена пластичным мелкоямочным рельефом характерным для данного материала (рисунок 3.17г - 3.21г и рисунок 3.22д - 3.26д).

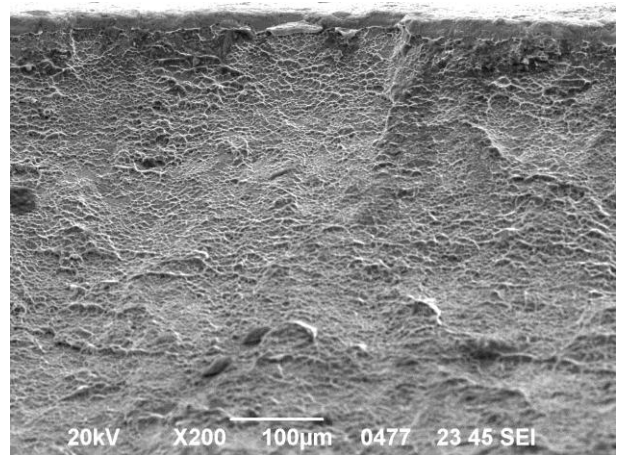
Необходимо отметить, что пластическая деформация образцов, испытанных при комнатной температуре, значительно меньше, чем образцов, испытанных при повышенной температуре, о чем свидетельствует ярко выраженная волокнистость, наблюдаемая при малых увеличениях.



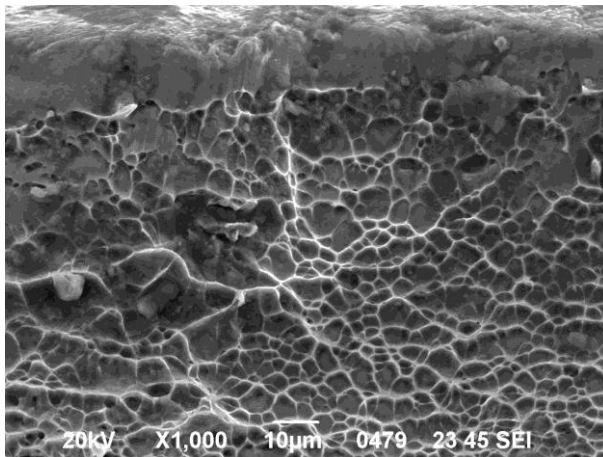
а)



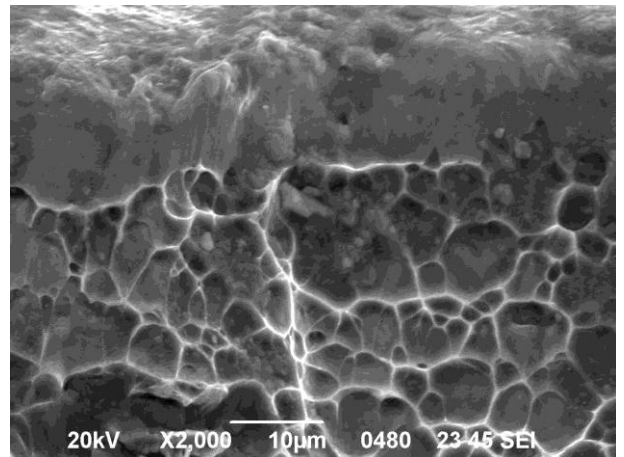
б)



в)

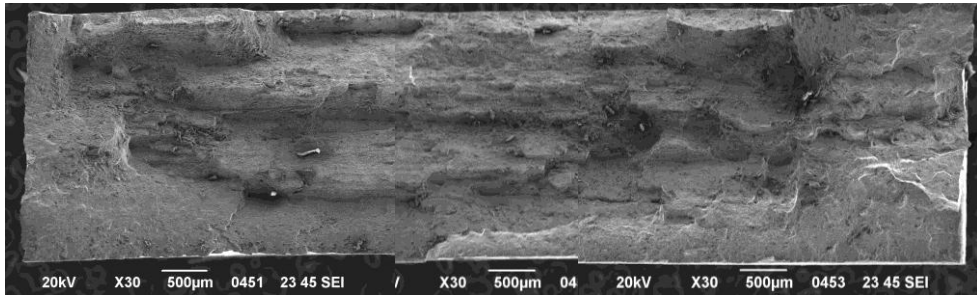


г)

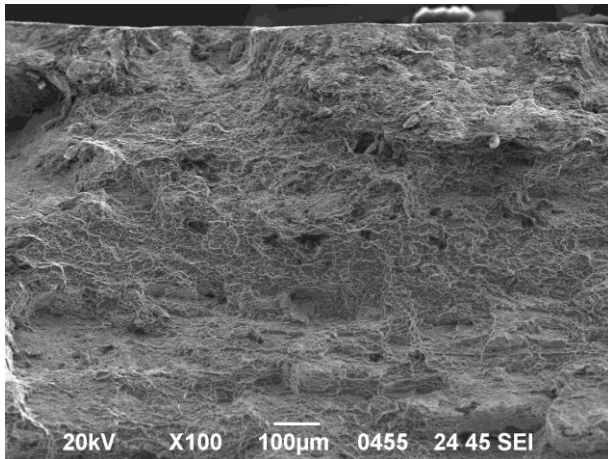


д)

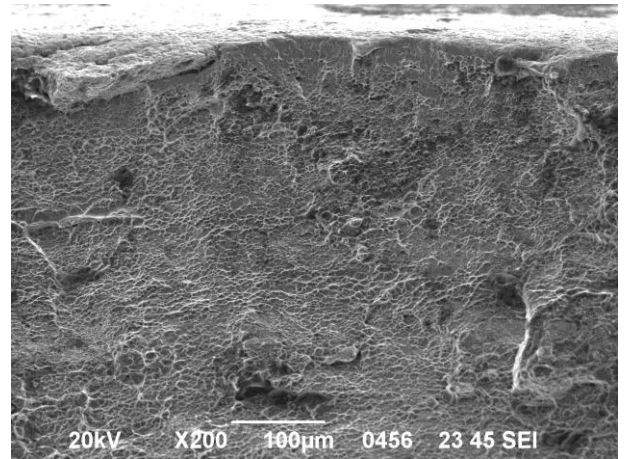
Рисунок 3.17 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (без обработки) после испытаний на растяжение при комнатной температуре



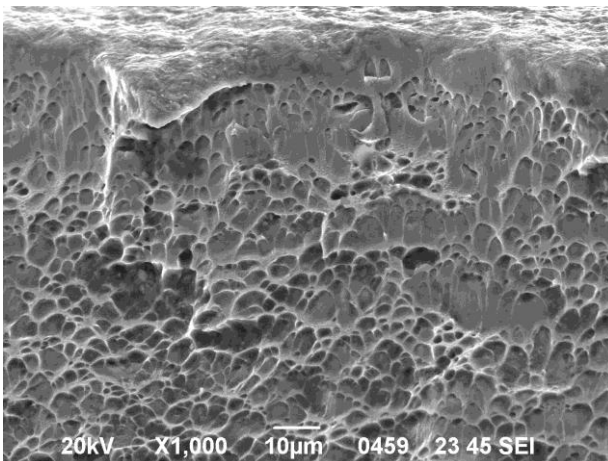
а)



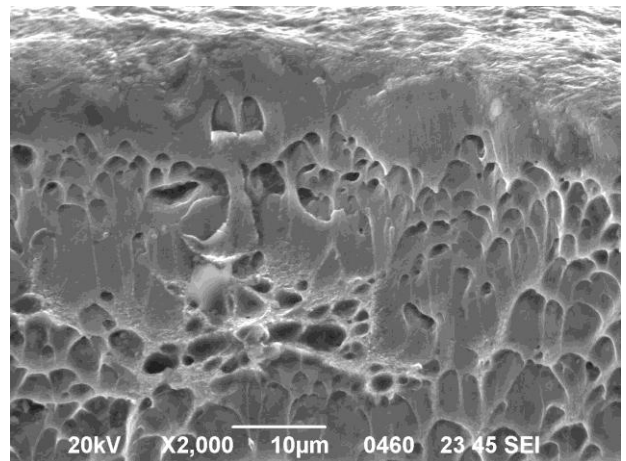
б)



в)

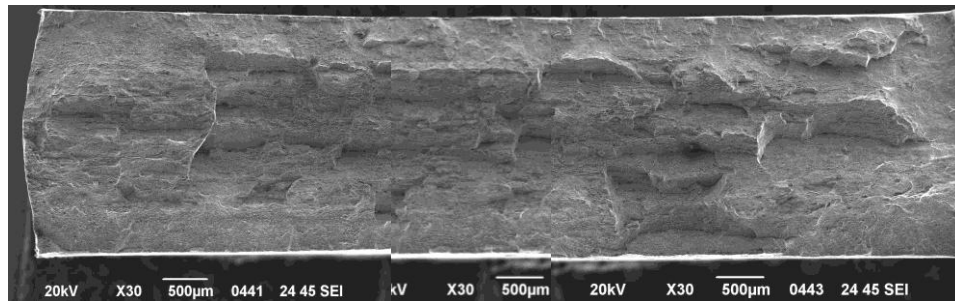


г)

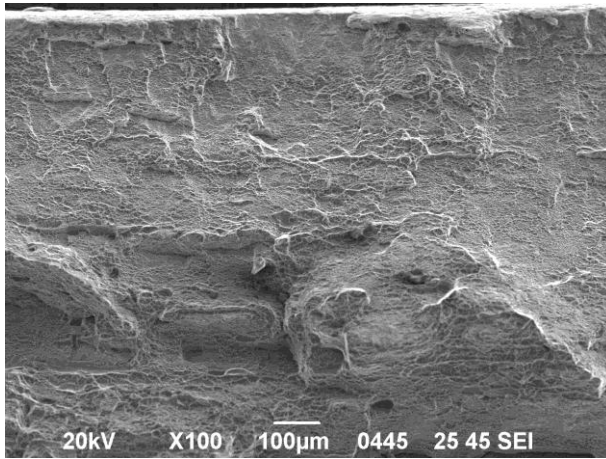


д)

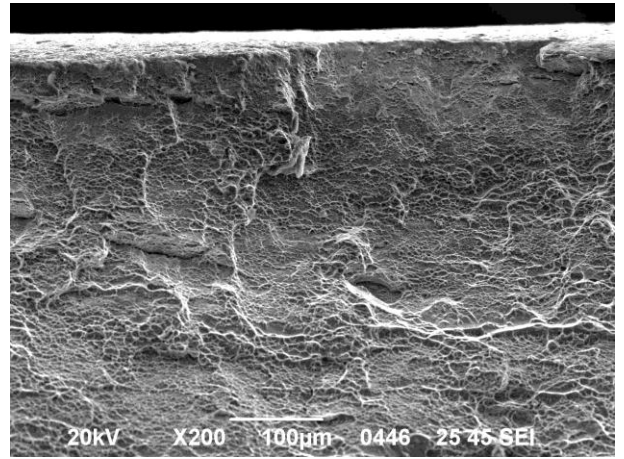
Рисунок 3.18 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (с загрязнениями) после испытаний на растяжение при комнатной температуре



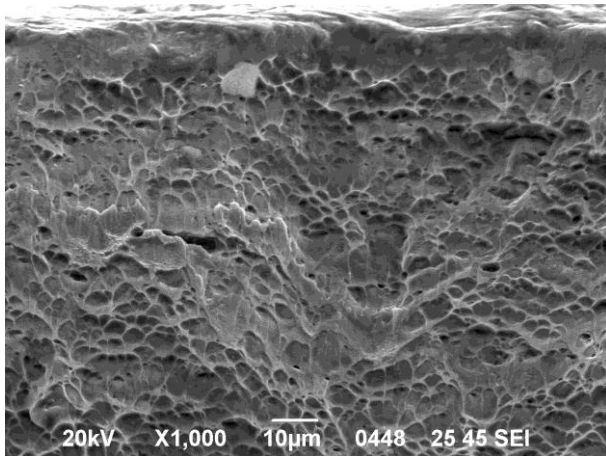
а)



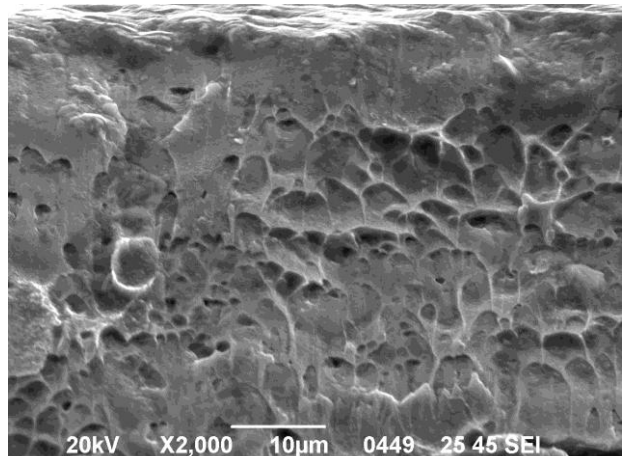
б)



в)

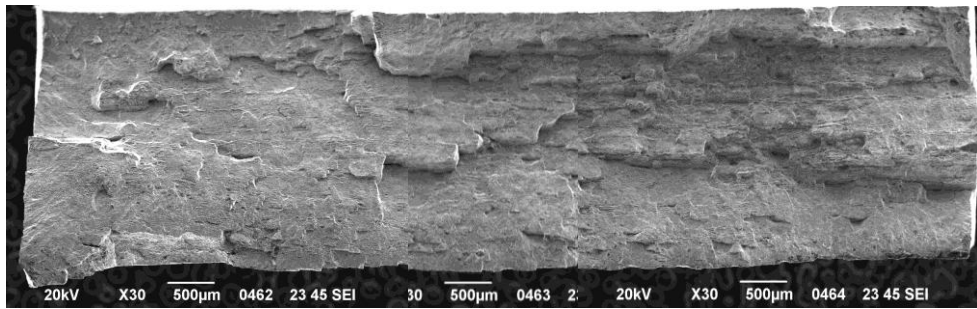


г)

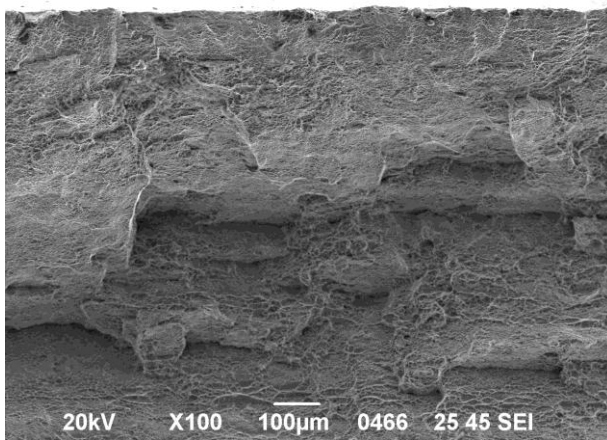


д)

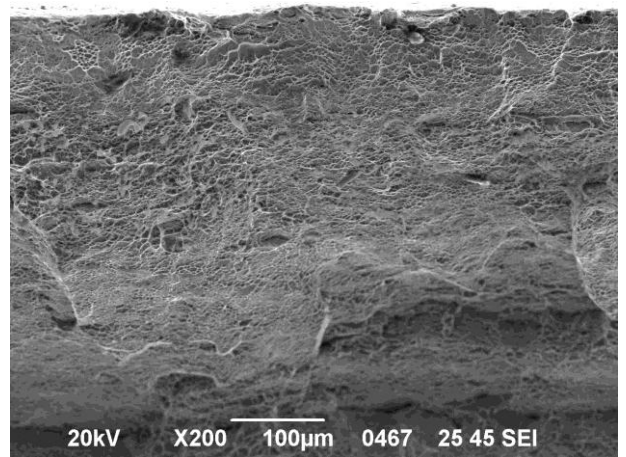
Рисунок 3.19 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (очищенного от загрязнений раствором OP1) после испытаний на растяжение при комнатной температуре



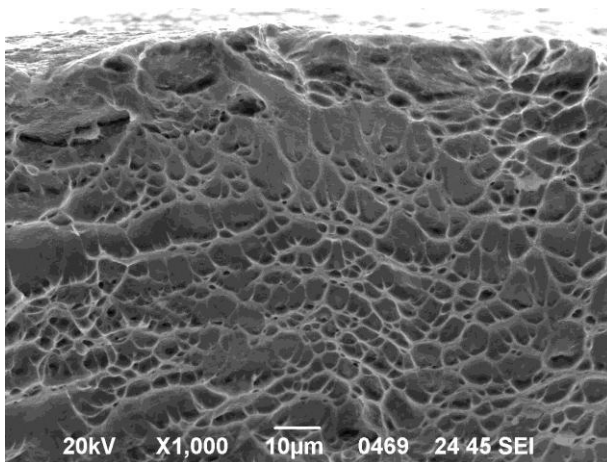
a)



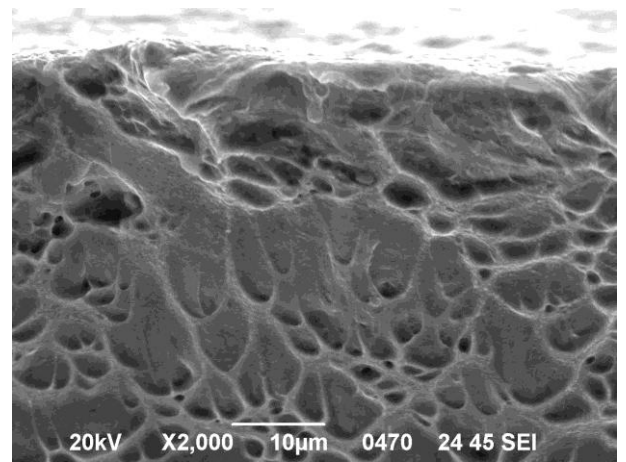
б)



в)

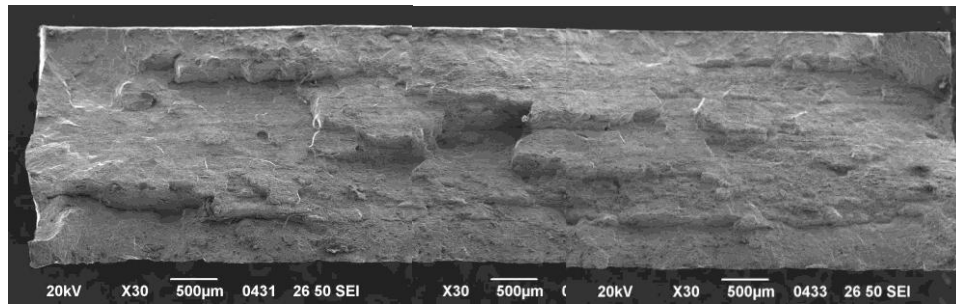


г)

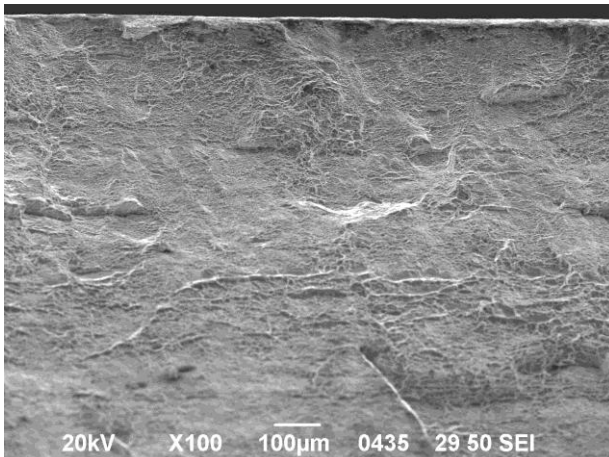


д)

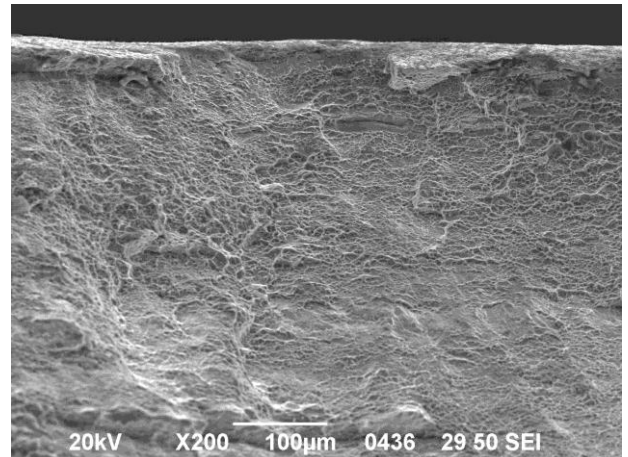
Рисунок 3.20 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (очищенного от загрязнений щелочным и кислотным растворами («рыхление + травление»)) после испытаний на растяжение при комнатной температуре



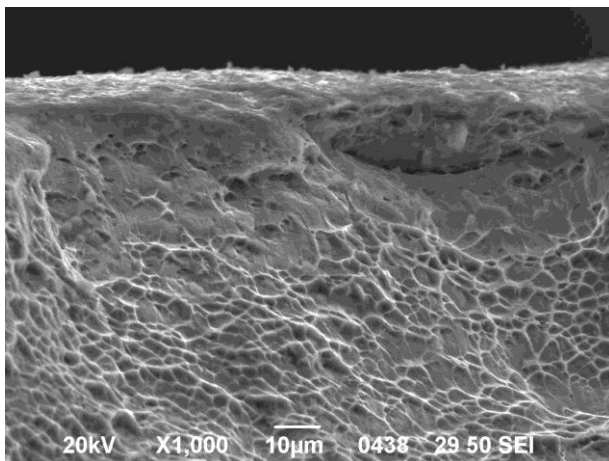
а)



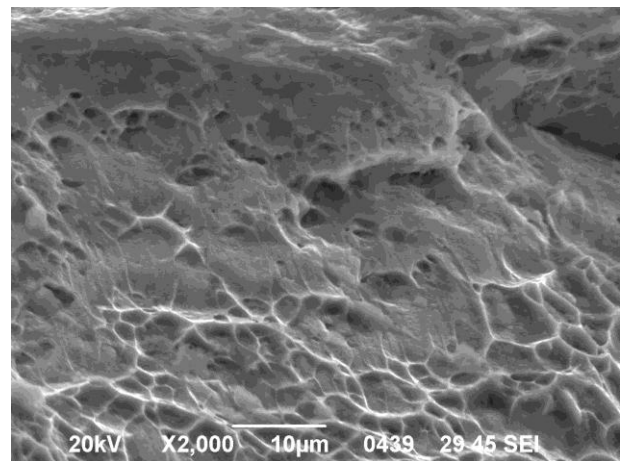
б)



в)



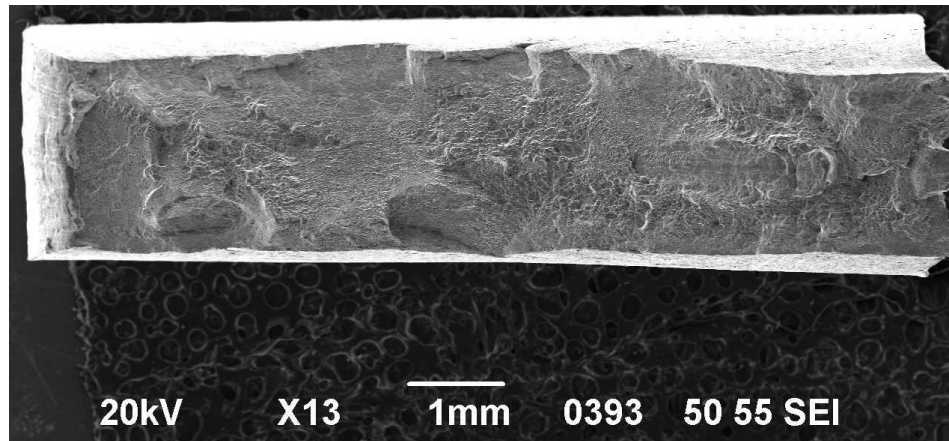
г)



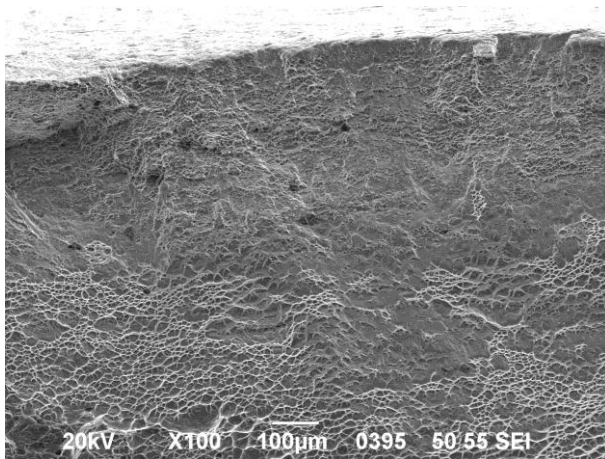
д)

Рисунок 3.21 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (очищенного от загрязнений раствором HDL 202) после испытаний на растяжение при комнатной температуре

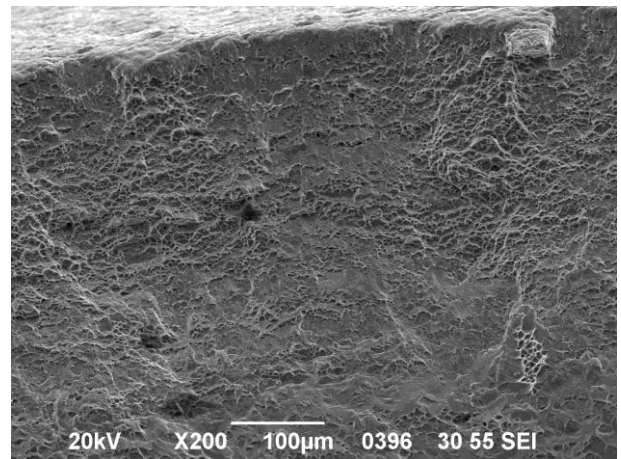




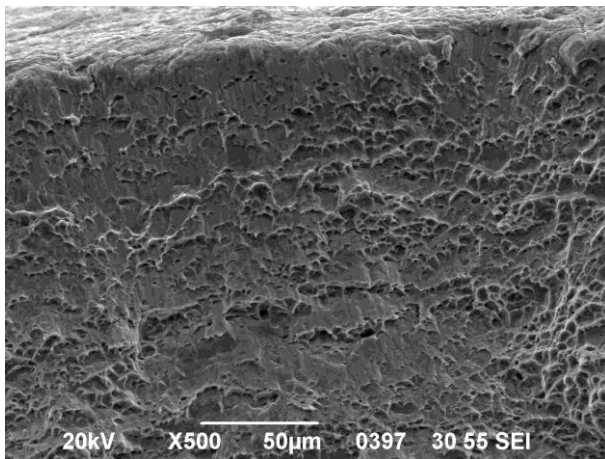
a)



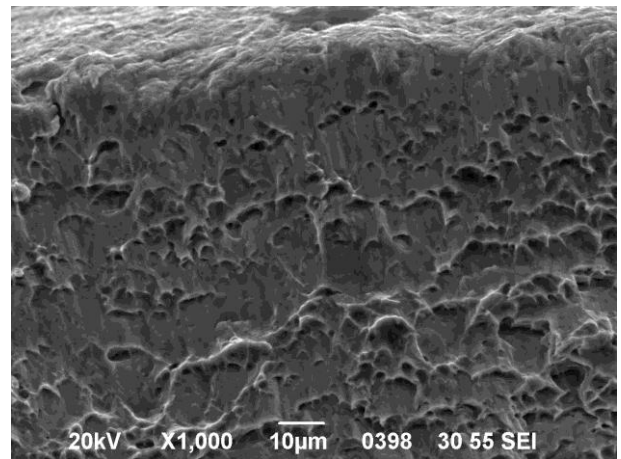
б)



в)

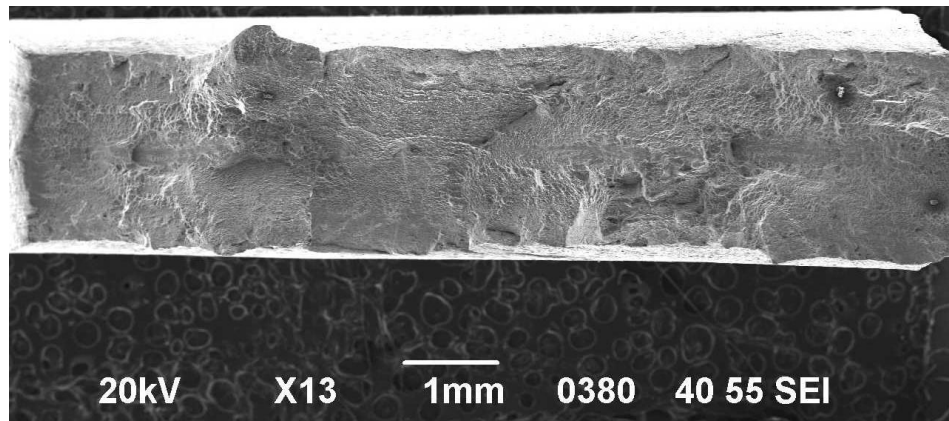


г)

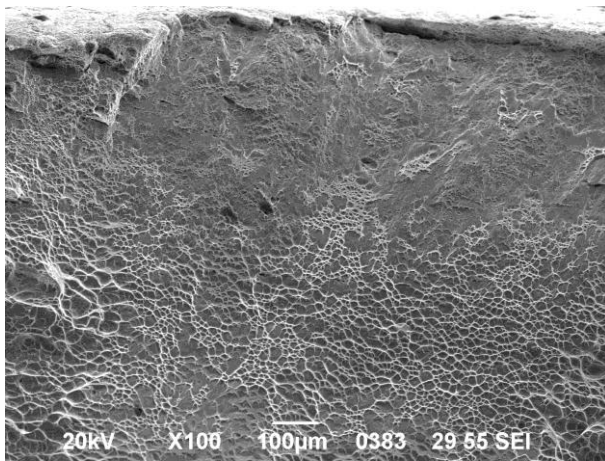


д)

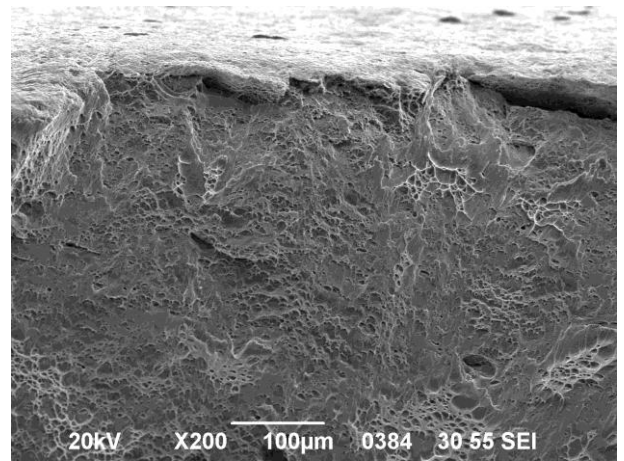
Рисунок 3.22 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (без обработки) после испытаний на растяжение при температуре 450°C



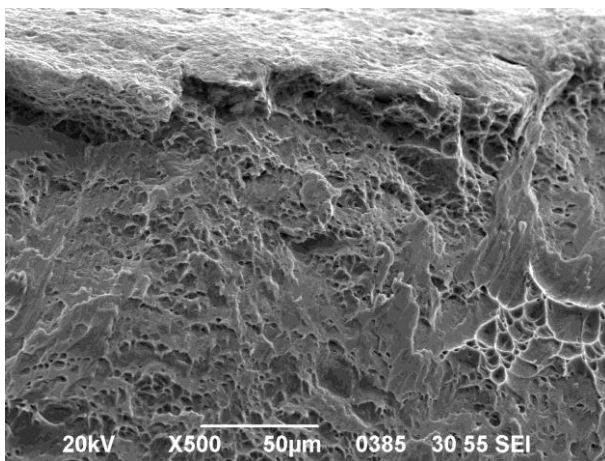
a)



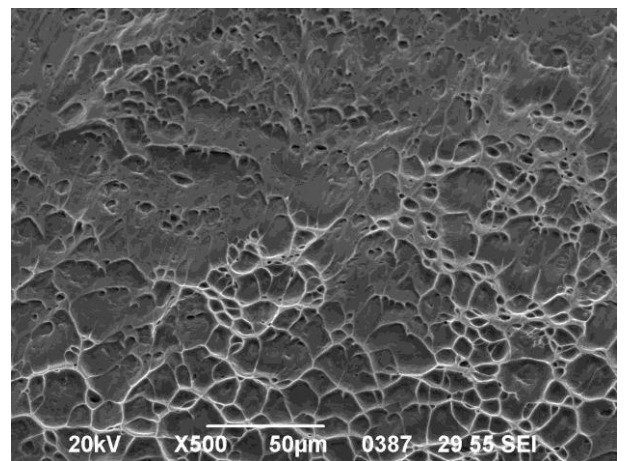
б)



в)

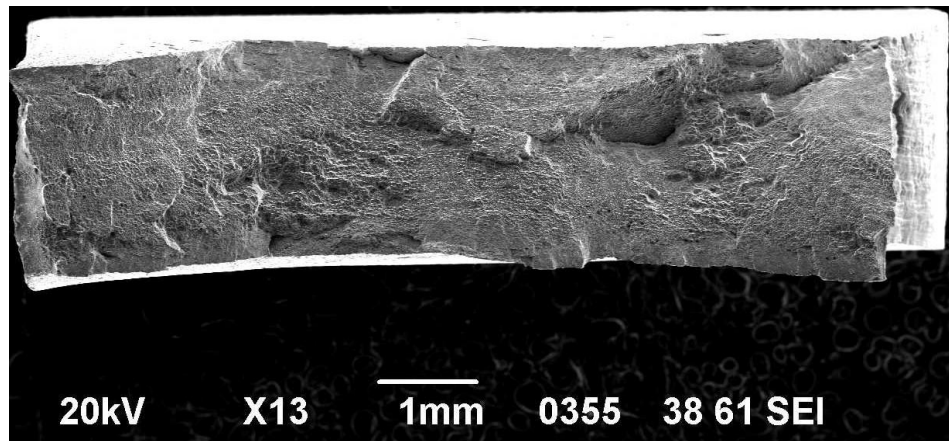


г)

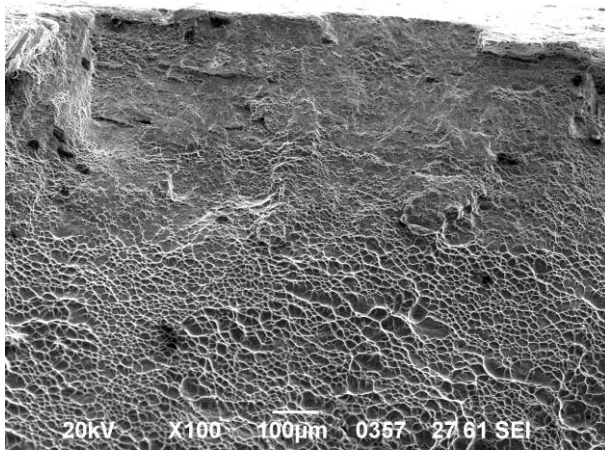


д)

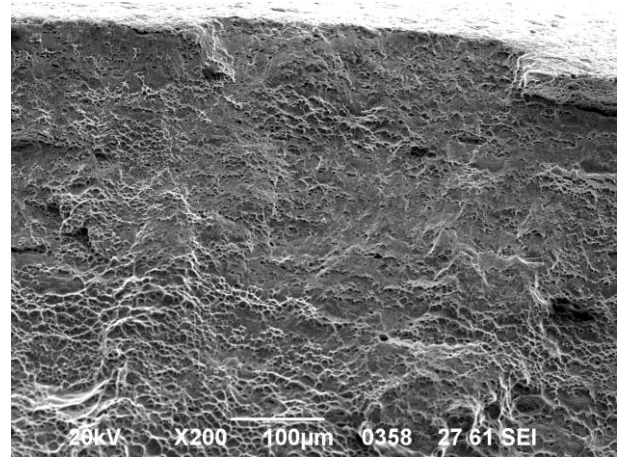
Рисунок 3.23 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава ВТ20 (с загрязнениями) после испытаний на растяжение при температуре 450°C



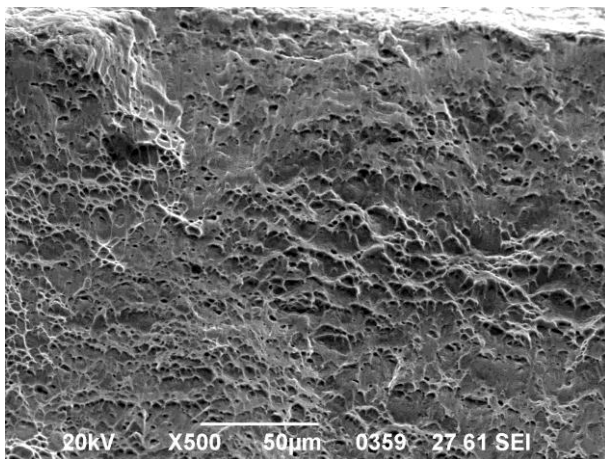
а)



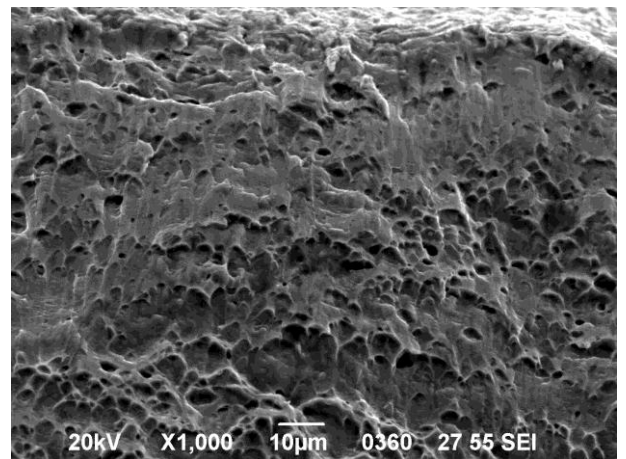
б)



в)

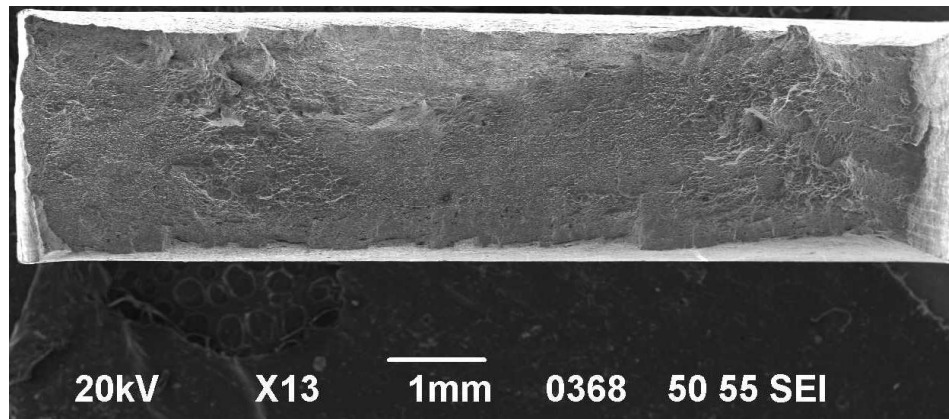


г)

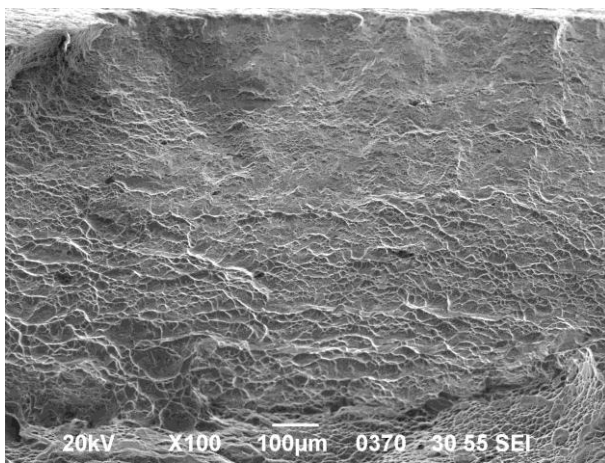


д)

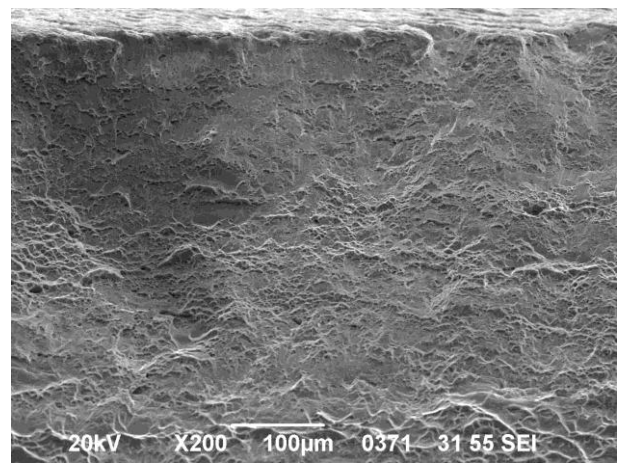
Рисунок 3.24 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (очищенного от загрязнений раствором OP 1) после испытаний на растяжение при температуре 450°C



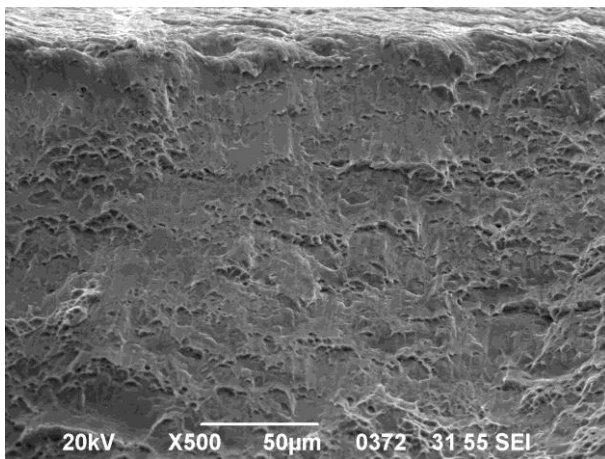
a)



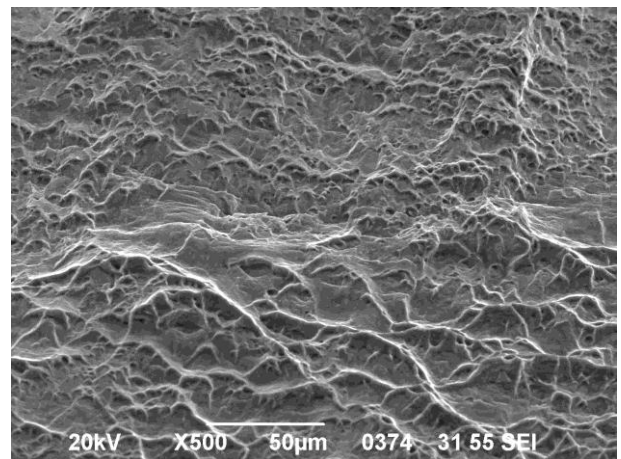
б)



в)

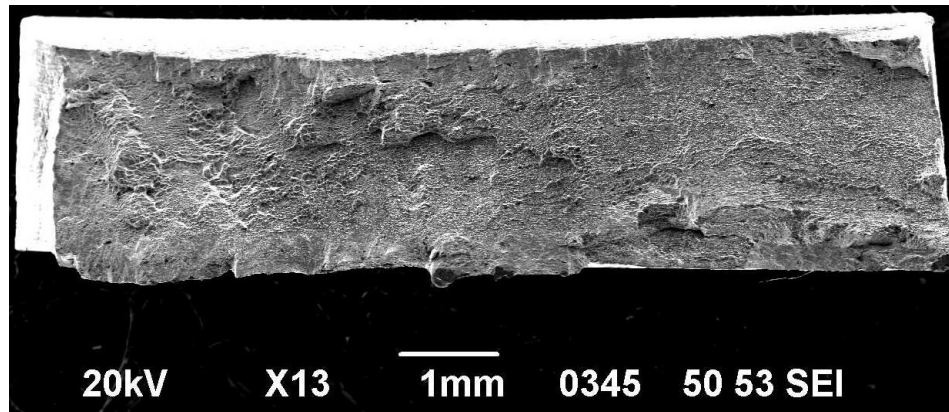


г)

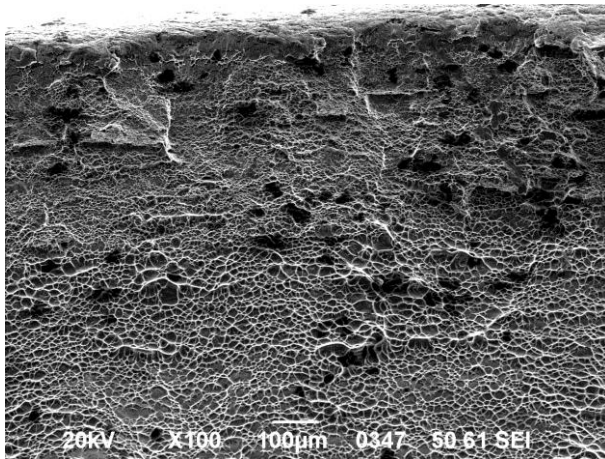


д)

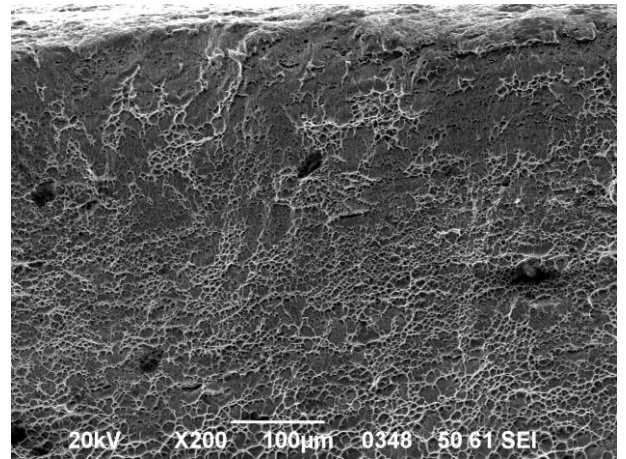
Рисунок 3.25 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (очищенного от загрязнений щелочным и кислотным растворами («рыхление + травление»)) после испытаний на растяжение при температуре 450°C



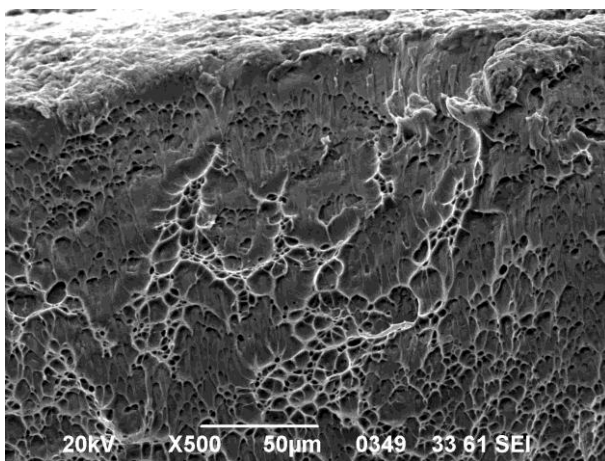
a)



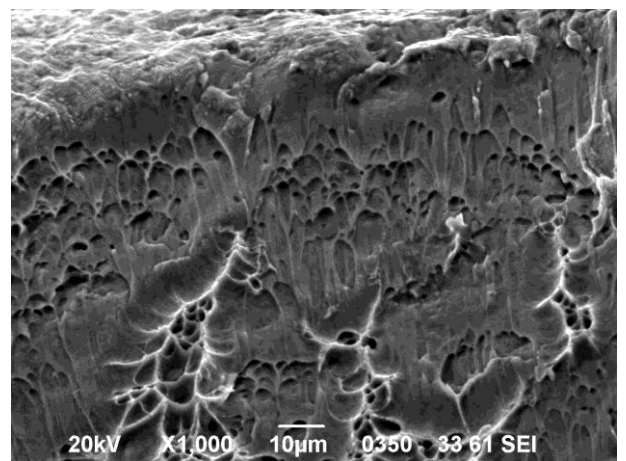
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.26 - Вид поверхности излома (а-д) образца титанового сплава BT20 (очищенного от загрязнений раствором HDL 202) после испытаний на растяжение при температуре 450°C

### 5.3 Прочность и пластичность образцов в условиях длительного статического нагружения

После удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности образцов титанового сплава ВТ20 при помощи раствора ОР1, щелочного и кислотного растворов («рыхление + травление») и раствора HDL 202 были проведены испытания на длительную прочность при температуре 450°C и напряжении 620 МПа. 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 таблице 3.8. Примеры, полученных кривых ползучести, показаны на рисунках 3.27-3.32.

Данные таблицы 3.8 показывают, что вне зависимости от вида применяемого раствора не происходит снижение времени до разрушения и пластичности образцов. Аналогичное время до разрушения и пластичность имеют исходные образцы и образцы с загрязнениями. Имеющийся разброс по времени до разрушения незначителен и характерен для данного вида испытаний. Виды кривых ползучести не имеют принципиальных отличий.

На всех кривых ползучести, представленных на рисунках 3.27-3.32, наблюдаются 3 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.

Начальный период ползучести с уменьшающейся скоростью соответствует преобладанию тормозящего действия упрочнения над всеми другими процессами, которые возникают за счет развития пластической деформации. Второй период ползучести с постоянной скоростью соответствует подвижному равновесию процессов торможения (упрочнение,

старение) и ускорения (рекристаллизация) ползучести. Заключительный период ползучести с возрастающей скоростью отражает преобладание факторов, разупрочняющих металл, и заканчивается образованием шейки.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что, как образование углеродсодержащих загрязнений на поверхности, так и их удаление с поверхности титанового сплава ВТ20, любым из исследуемых растворов, не оказывает существенного влияния на характеристики длительной прочности, а также не влияет на ползучесть материала.

Таблица 3.8 - Длительная прочность образцов титанового сплава ВТ20 (при температуре 450°C) после удаления загрязнений различными растворами

Название раствора	Постоянно приложенное напряжение $\sigma$ , МПа	Время до разрушения $\tau_p$ , ч	Относительное удлинение $\delta$ , %
без обработки (исходное состояние)	620	153	34
с загрязнениями		148	30
ОР1		159	35
«рыхление + травление»		150	32
HDL 202		143	33

Примечание: приведены средние значения

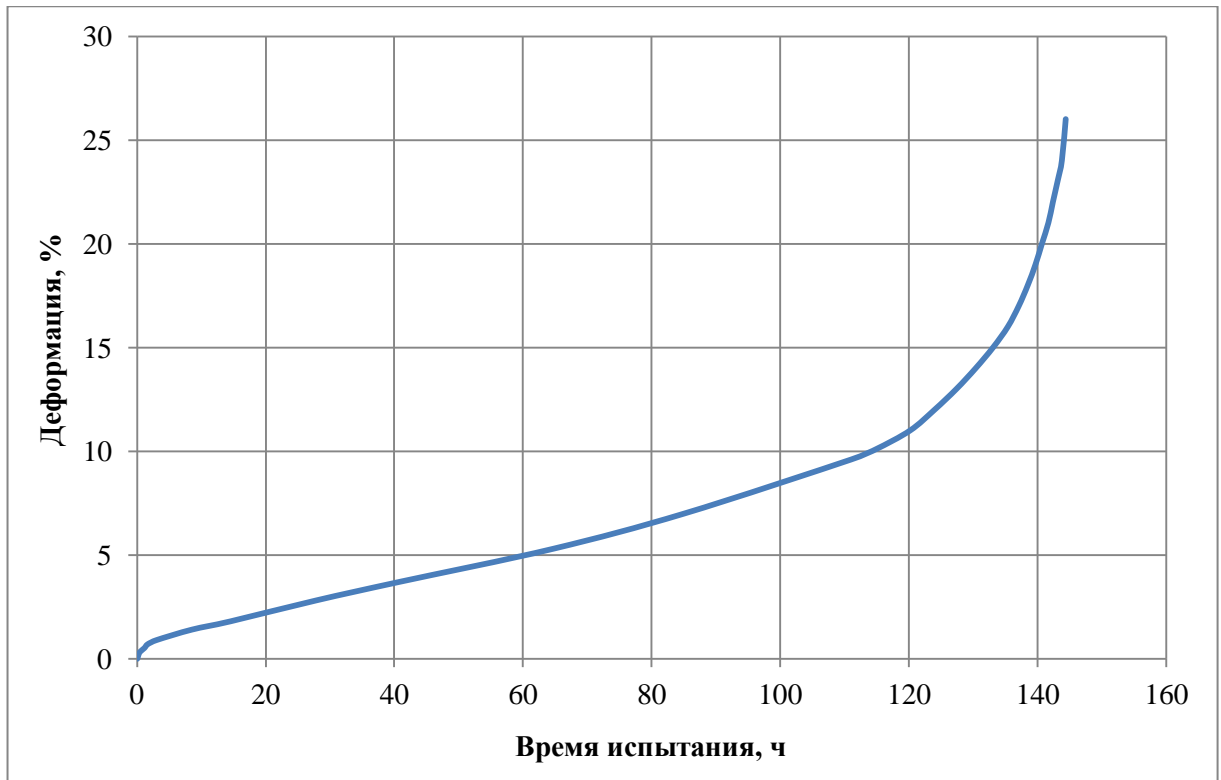


Рисунок 3.27 - Кривая ползучести титанового сплава ВТ20 (без обработки), полученная при испытании на длительную прочность при температуре 450°C и напряжении 620 МПа

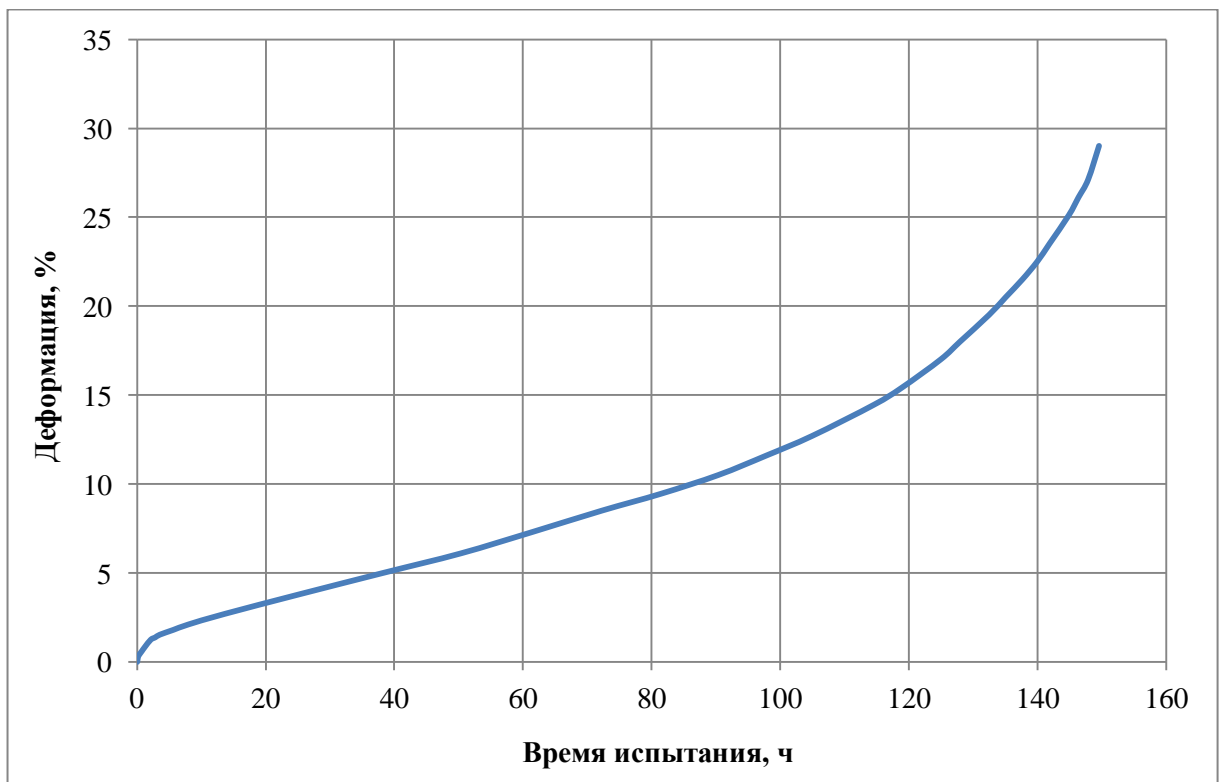


Рисунок 3.28 - Кривая ползучести титанового сплава ВТ20 (с загрязнениями), полученная при испытании на длительную прочность при температуре 450°C и напряжении 620 МПа



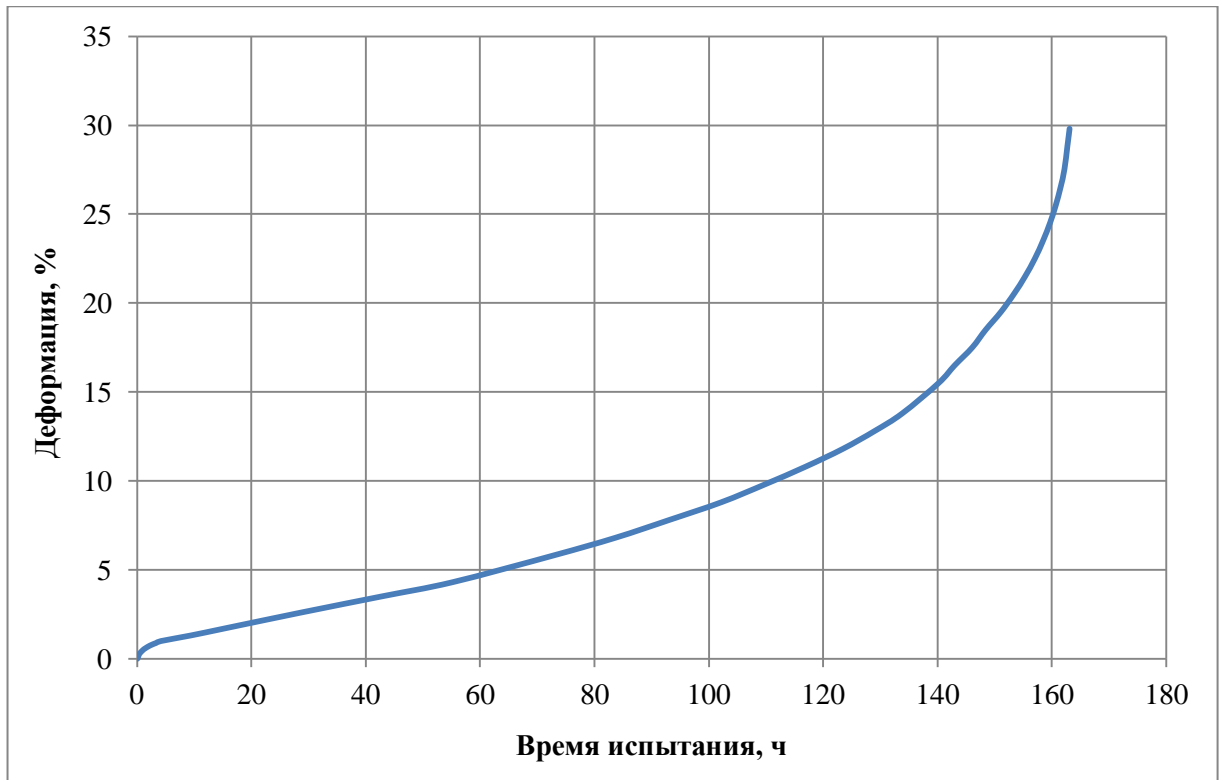


Рисунок 3.29 - Кривая ползучести титанового сплава VT20 (очищенного от загрязнений раствором ОР 1), полученная при испытании на длительную прочность при температуре 450°C и напряжении 620 МПа

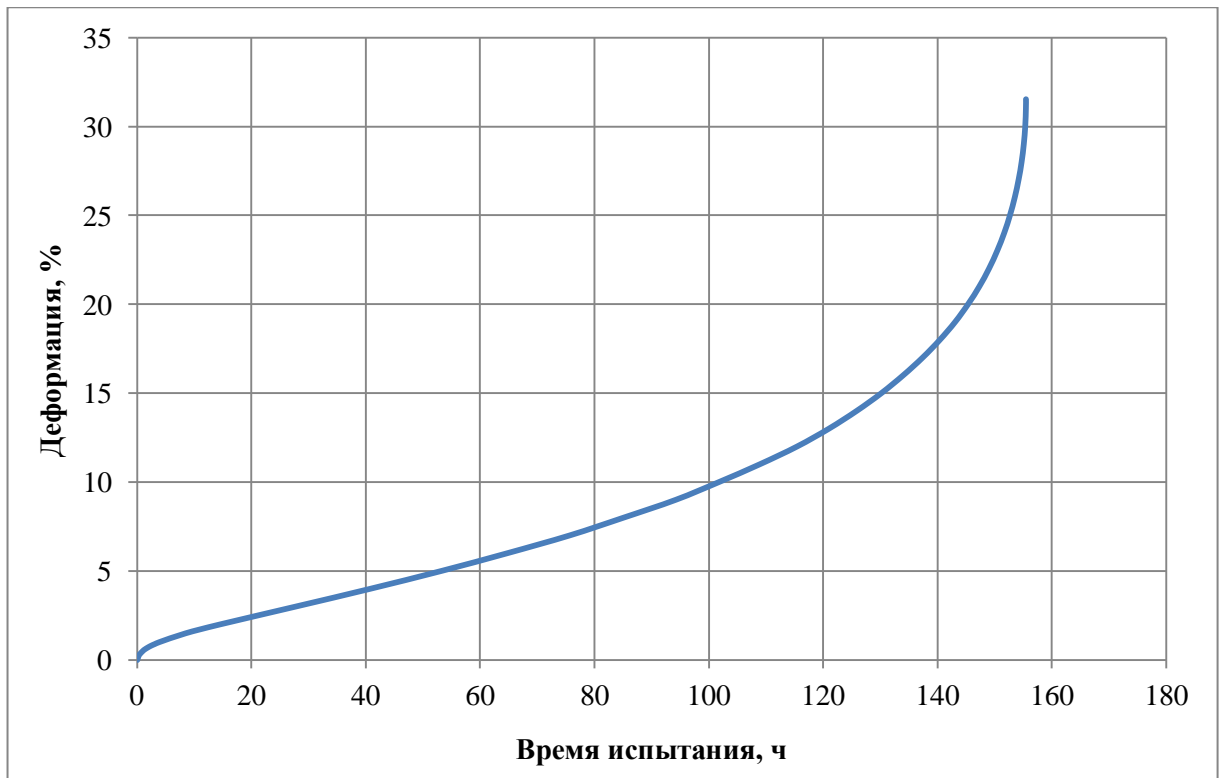


Рисунок 3.30 - Кривая ползучести титанового сплава VT20 (очищенного от загрязнений щелочным и кислотным растворами («рыхление + травление»)), полученная при испытании на длительную прочность при температуре 450°C и напряжении 620 МПа

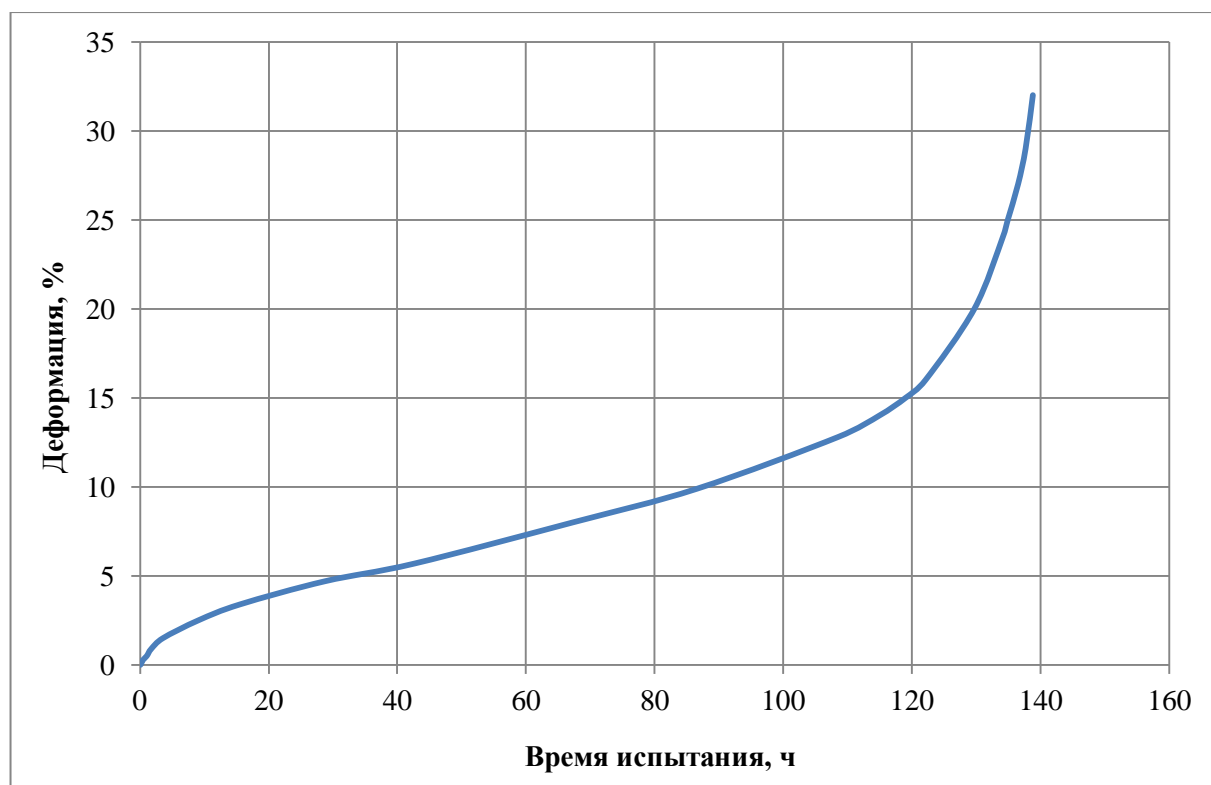


Рисунок 3.31 - Кривая ползучести титанового сплава VT20 (очищенного от загрязнений раствором HDL 202), полученная при испытании на длительную прочность при температуре 450°C и напряжении 620 МПа

## **6 Исследование качества очистки лопаток компрессора газотурбинного двигателя**

Оценка эффективности очистки поверхности образцов титанового сплава VT20 от углеродсодержащих загрязнений зарубежными и отечественными растворами, а также оценка изменения свойств поверхности показали, что наилучшей очищающей способностью обладают очищающий раствор на водной основе OP1, щелочной и кислотный растворы («рыхление + травление») и раствор HDL 202. Указанные технологии не приводят к ухудшению шероховатости, микротвердости поверхности и механических свойств. Однако следует отметить, что после удаления углеродсодержащих загрязнений с использованием данных растворов происходит снижение активности поверхности, наименьшее из которых обеспечивает раствор OP1. Также следует отметить то, что раствор HDL 202, щелочной и кислотный

растворы могут приводить к потере массы основного металла при удалении загрязнений. Таким образом, для опробования удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности лопаток компрессора ГТД был выбран раствор ОР1.

Для исследования были выбраны две компрессорные лопатки: лопатка № 1 (маленькая) после эксплуатации с небольшим количеством загрязнений на поверхности (рисунок 3.32а) и лопатка № 2 (большая), на которую были нанесены загрязнения, имитирующие эксплуатационные, в лабораторных условиях (рисунок 3.33а, б).

До и после удаления загрязнений был определен качественный химический состав поверхности, микротвердость, шероховатость и активность поверхности. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 3.9. Вид лопаток после удаления загрязнений представлен на рисунках 3.32б и 3.33в.

Таблица 3.9 - Состояние поверхности титановых лопаток компрессора ГТД после удаления углеродсодержащих загрязнений

Наименование лопатки	Микротвердость (HV)		Шероховатость (Ra), мкм		Активность поверхности, В	
	исходное	после очистки	исходное	после очистки	исходное	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

Значения шероховатости поверхности после очистки не изменяются, как для лопатки №1, так и для лопатки № 2. Пример 3D изображений и профилей типичных участков поверхности лопатки № 1 до и после очистки представлен на рисунках 3.34 и 3.35. Обработка в растворе ОР1 благоприятно сказывается на активности поверхности лопатки № 1, о чем свидетельствует

повышение значений контактной разности потенциалов, однако приводит к небольшому понижению (около 10%) активности поверхности лопатки № 2. Удаление загрязнений с поверхности лопаток № 1 и № 2 не приводят к газонасыщению поверхностных слоев, значения микротвердости до и после обработки находятся приблизительно на одном уровне.



Рисунок 3.32 - Вид лопатки № 1: а) после эксплуатации; в) после удаления загрязнений

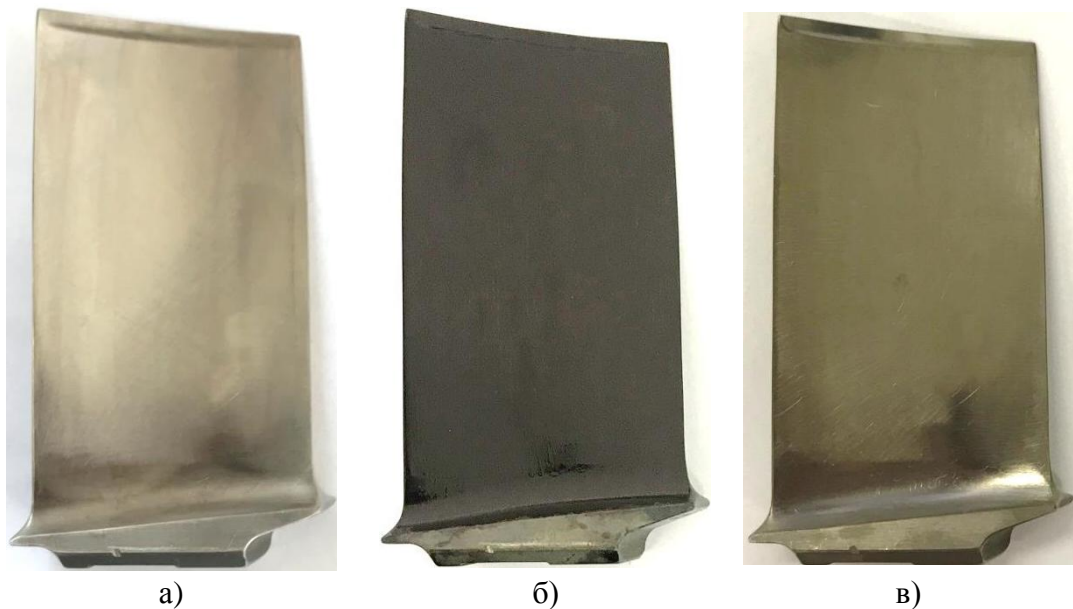
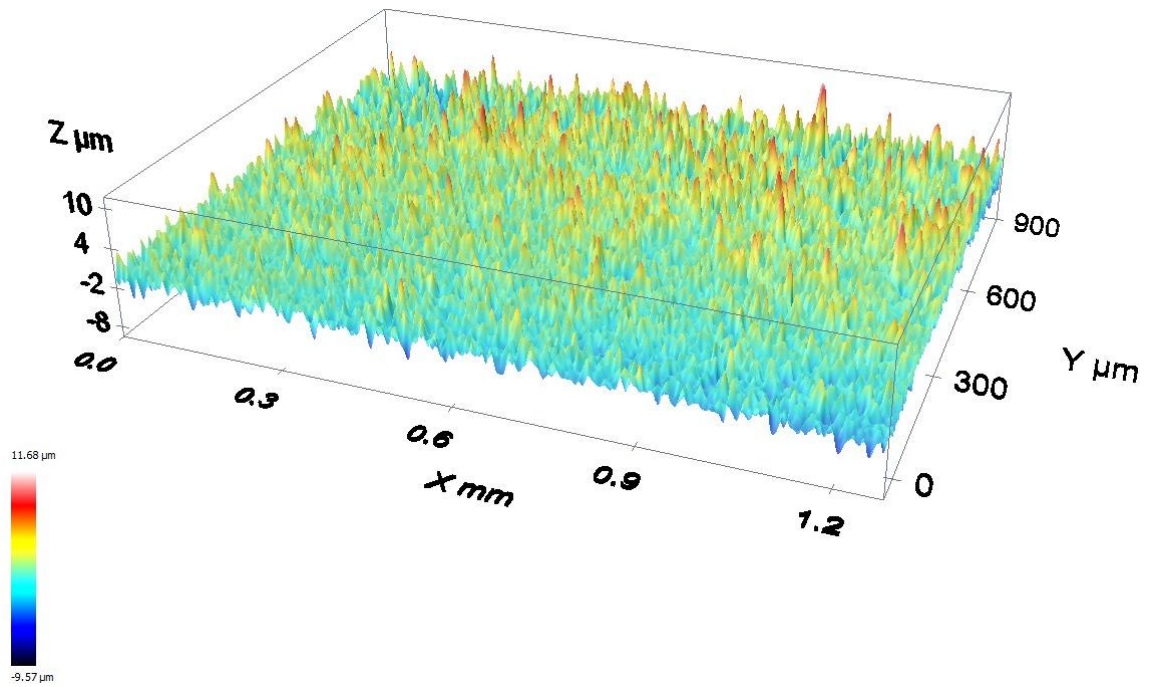
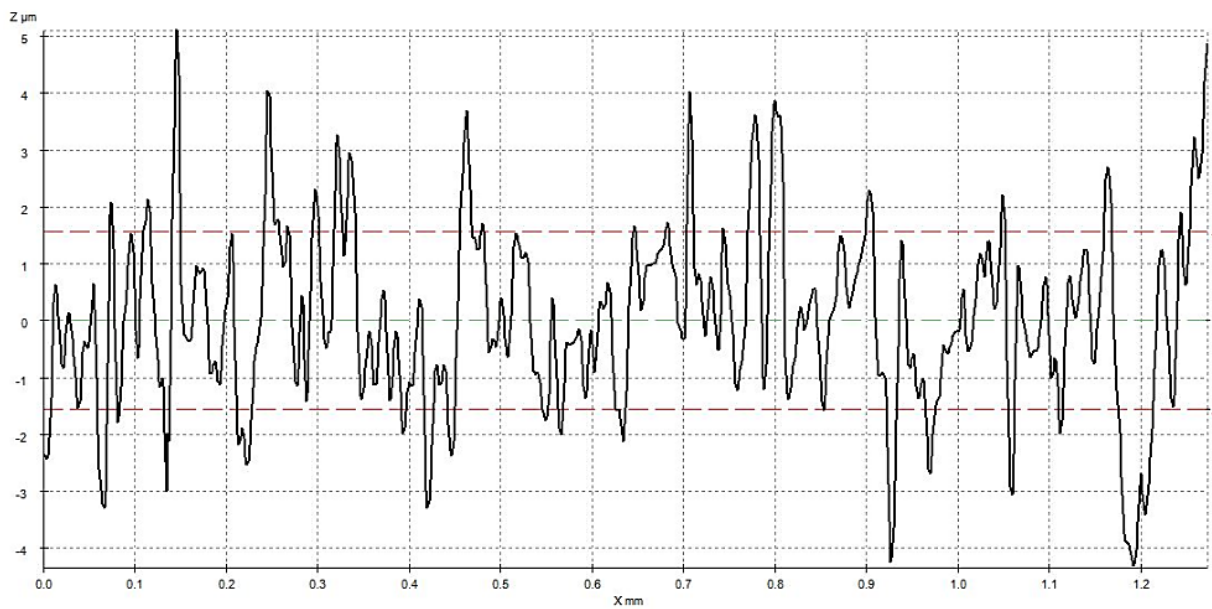


Рисунок 3.33 - Вид лопатки № 2: а) в исходном состоянии; б) после нанесения загрязнений; в) после удаления загрязнений

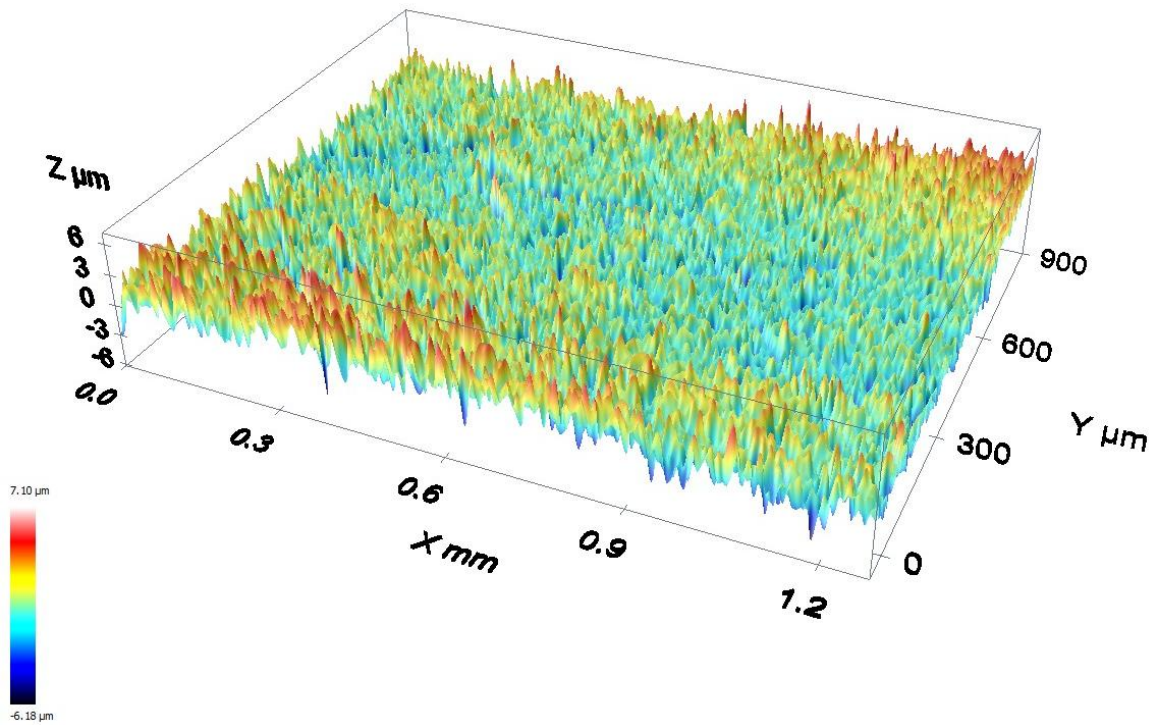


а) x10

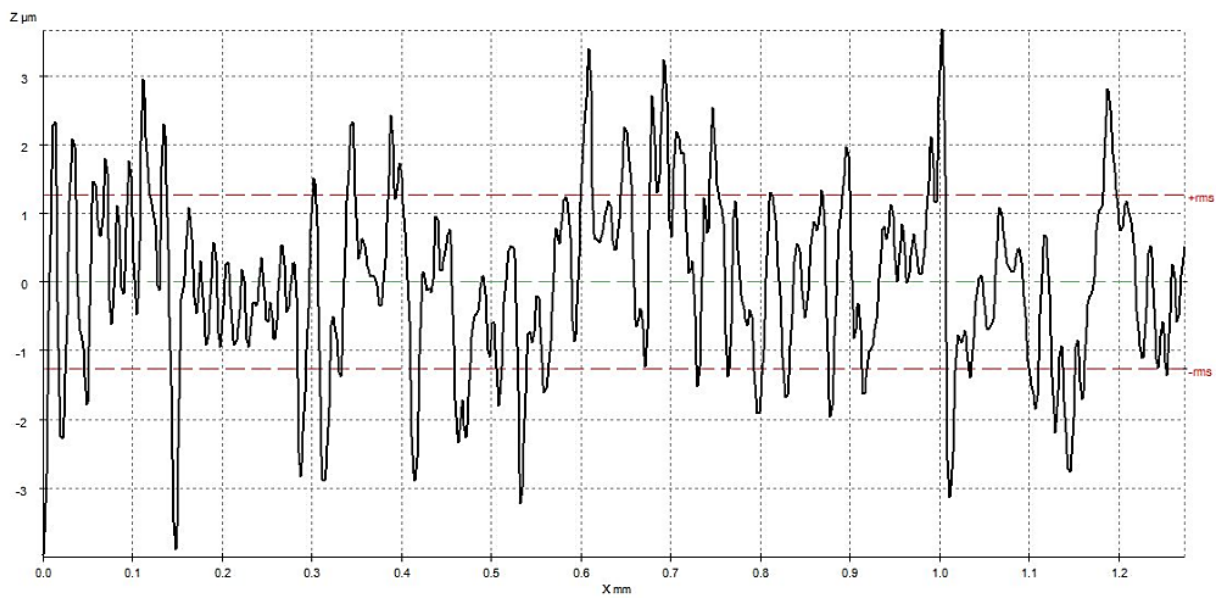


б)

Рисунок 3.34 - Типичный участок поверхности лопатки № 2 в исходном состоянии:  
а) 3D-изображение; б) профиль



a) x10



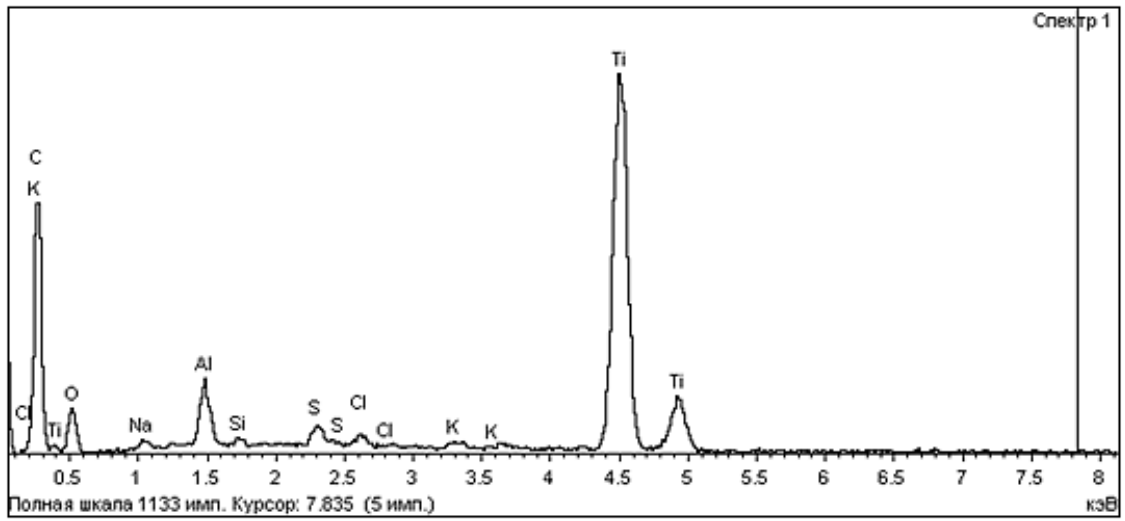
б)

Рисунок 3.35 - Типичный участок поверхности лопатки № 2 в после удаления загрязнений раствором ОР1: а) 3D-изображение; б) профиль

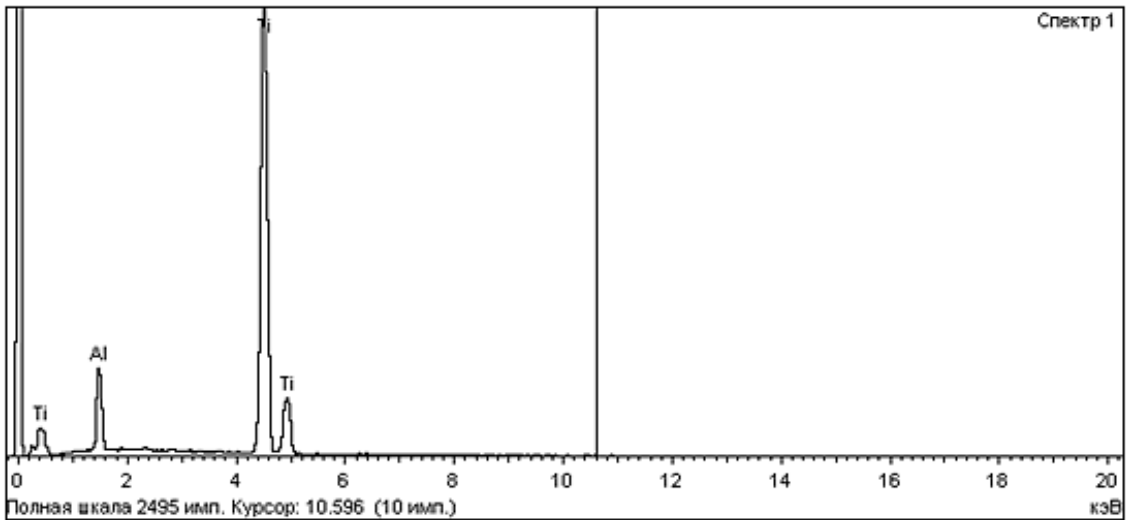
В спектрограммах, полученных с поверхности лопатки № 1, наблюдается наличие таких элементов как сера, кислород и углерод, свидетельствующие о наличии углеродсодержащих загрязнений (рисунок 3.36а). После обработки данной лопатки в очищающем растворе на водной основе ОР1 поверхность лопатки стала более светлая (рисунок 3.32б), а в спектрограммах наблюдаются только химические элементы, входящие в состав сплава: титан и алюминий (рисунок 3.36б), 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.

По результатам проведенных в работе исследований была рекомендована следующая химическая технология для удаления углеродсодержащих загрязнений с поверхности деталей проточной части компрессора газотурбинных двигателей и установок, изготовленных из титанового сплава BT20: обработка загрязненных деталей и узлов методом погружения в очищающий раствор на водной основе ОР1 при температуре 50-60°C с выдержкой до 2 ч и последующей промывкой в горячей и холодной воде с использованием ультразвуковой установки.

Указанная технология обеспечивает полную очистку загрязненных образцов титанового сплава BT20 без потери массы основного металла, изменения макроструктуры, микрогеометрии поверхности и ухудшения физико-механических свойств, а именно увеличения поверхностной микротвердости, снижения прочности и пластичности, в том числе при длительном нагружении при повышенных температурах. Также указанная технология в сравнении с аналогами обеспечивает минимальное снижение потенциала поверхности. Детали, обработанные в очищающем растворе ОР1, при проведении ремонтно-восстановительных мероприятий могут беспрепятственно паяться.



а)



б)

Рисунок 3.36 - Спектрограммы, полученные с типичного участка поверхности лопатки №1: а) после эксплуатации; б) после удаления загрязнений раствором ОР1



## Выводы

1. Показано, что наиболее эффективное удаление углеродсодержащих загрязнений с поверхности титанового сплава BT20 обеспечивают: очищающий раствор на водной основе OP1 (РФ), щелочной и кислотный растворы (РФ) и щелочной раствор HDL 202 (Канада). Растворы TSP-5050, TSP-3030, ZOK-27, See Bee EPC-1 и AP 954 не обеспечивают полного очищения поверхности от загрязнений.

2. Установлено, что при удалении углеродсодержащих загрязнений очищающим раствором OP1, раствором HDL 202, щелочным и кислотным растворами при повышенных температурах увеличение микротвердости за счет газонасыщения поверхности продуктами химических реакций не превышает 5%.

3. Химическая очистка поверхности образцов титанового сплава BT20 приводит к снижению поверхностного потенциала. Установлено, что наименьшую степень снижения потенциала (24%) обеспечивает очищающий раствор OP1, наибольшую (54%) - раствор HDL 202.

4. Удаление углеродсодержащих загрязнений очищающим раствором OP1 и щелочным и кислотным растворами не приводит к ухудшению микрогеометрии и макроструктуры поверхности образцов, что свидетельствуют об отсутствии растворения в исследуемых растворах основного материала.

5. Установлено, что обработка в растворе HDL 202, растворе OP1, щелочном и кислотном растворах не приводит к ухудшению технологических характеристик припоя ВПр16, что свидетельствует о возможности применения указанных химических технологий очистки при ремонте деталей ГТД методом пайки.

6. Показано, что очистка углеродсодержащих загрязнений исследуемыми в работе растворами не приводит к снижению механических

характеристик титанового сплава ВТ20 и изменению закономерностей его разрушения при комнатной и повышенной температурах.

7. Разработаны рекомендации по удалению углеродсодержащих загрязнений с поверхности деталей из титанового сплава ВТ20, заключающиеся в обработке загрязненных деталей методом погружения в очищающий раствор на водной основе ОР1 при температуре 50-60°C, с выдержкой до 2 часов и последующей промывкой в горячей и холодной воде с использованием ультразвуковой установки. Обработка по указанной технологии не приводит к ухудшению физико-механических характеристик титанового сплава ВТ20.

**Список сокращений и условных обозначений**

ГТД - газотурбинный двигатель

ГТУ - газотурбинная установка

КПД- коэффициент полезного действия

ВНА - входной направляющий аппарат

КВОУ - комплексное воздухоочистительное устройство

СТО - стандарт организации

ПАВ - поверхностно активное вещество

РВЭ - работа выхода электрона

КРП - контактная разность потенциалов

АГД-очистка - аэрозольно-гидродинамическая очистка или  
аэрогидродинамическая очистка

СИЭП - сильноточные импульсные электронные пучки

W - энергия облучения

Ra - среднеарифметическое отклонение профиля поверхности

HV - твердость по Виккерсу

$\sigma_{-1}$  - предел выносливости

$h_0$  - толщина окисленного слоя

$\Delta m$  - удельное изменение массы

$\sigma_B$  - предел прочности

$\sigma_T$  - предел текучести

$\delta$  - относительное удлинение

$\psi$  - относительное сужение

РСМА - рентгеноспектральный микроанализ

Rz - наибольшая высота профиля поверхности

$\theta_{cp}$  - краевой угол смачивания

$\sigma_{0.2}$  - условный предел текучести

$\tau_p$  - время до разрушения

**Список используемых источников**

1. Михайлов Д.А., Недашковский А.П., Ивченко Т.Г. Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - 2014. - № 1(47). - С. 213-224.
2. Рабочие лопатки авиационных ГТД. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток: Учебное пособие / Б.А. Чичков. - М.: МГТУ ГА, 2000. - 74 с.
3. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие / С.В. Цанев. - М.: МЭИ, 2002. - 584 с.
4. 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. - № 5(18). - P. 4458-4463.
5. Kurz, R., Brun K. Degradation in gas turbine systems // J. Eng. Gas Turbines Power. - 2001.- 123. - P. 70-77.
6. Еникеев Г.Г. Комплексная защита газотурбинного двигателя, эксплуатирующегося в запыленной атмосфере и морской среде // Вестник УГАТУ.- 2013. - № 3 (56). - С.41-48.
7. CT58 ER-7 Compressor blade coating // Heli-One [сайт] URL: <http://www.heli-one.com/services/engines/ct58/ct58-er7-compressor-spray> (дата обращения: 18.05.2018)
8. Белоусов М.Г., Цуркаль А.А. Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей // Труды МАИ. - 2013. - № 65. - С. 1 -14
9. Linden David H. Corrosion control in industrial axial flow compressors // Proceedings of the thirty turbomachinery symposium / A&M University, USA. - Texas, 2004. P. 115-120

10. Коняев Е.А., Ардешири Ш., Банбан В.Ф., Джавари П. Диагностические признаки загрязнения проточной части авиационных газотурбинных двигателей // Научный вестник МГТУ ГА. - 2014. - № 206. - С. 137-138.
11. Abass K.O. Techno-economic analysis of gas turbine compressor washing to combat fouling : MSc : School of engineering / Abass Kabir Oliade; Cranfield University. - Great Britain, 2015. - 131 p.
12. Абдуллин Б. Р. и др. К оценке технического состояния газотурбинного двигателя, работающего в условиях загрязнения проточной части / // Вестник УГАТУ. - 2007. - № 1(19). - С. 22-25.
13. Gas turbine compressor cleaning systems and chemicals for all types of gas turbines // Rochem technical services [сайт] URL: <http://www.rochem.net/pdfs/Fyrewash/Rochem%20Fyrewash.pdf> (дата обращения: 2.02.2016)
14. Эксплуатационные загрязнения газотурбоагрегатов ДВС и способы их очистки: Методические указания / Семенюк А.В., Андреев А.К., Семенюк Л.А. - Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2008. - 30 с.
15. Галанцев Н.К. Современные конструкции КВОУ для газотурбинных установок // Турбины и дизели. - 2014. - № 4. - С. 46-49.
16. Микаэлян Э.А. Повышение надежности, безопасности, устойчивой работы газотурбинных газоперекачивающих агрегатов // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. - 2009. - № 4. - С. 105 - 113.
17. Бодров, А.И. Исследование загрязнения и усовершенствование системы промывки проточной части осевых компрессоров ГТУ : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.04.12 / Бодров Андрей Игоревич. - СПб., 1999. - 25 с.
18. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: Учебное пособие / Л.В. Зысин. - СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010. - 368 с.

19. Marco O. Analysis of gas turbine compressor fouling and washing on line : PhD Thesis : School of Engineering / Marco Osvaldo; Cranfield University. - Great Britain, 2007. - 227 p.
20. Эксплуатация судовых турбомашин: Учебное пособие / Ю.В. Варечкин, М.Ю. Храмов. - Н. Новгород : ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. - 104с.
21. Мальцев, Е.Н. Разработка обобщенного метода расчета и проектирования системы влажной очистки проточной части ГТД и средств ее реализации : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.07.05 / Мальцев Евгений Николаевич. - Самара, 2013. - 20 с.
22. Сулейманов, А.М. Энергосбережение в технологических процессах трубопроводного транспорта газа: автореф. дис. ... канд. тех. наук : 25.00.19 / Сулейманов Азат Маратович. - Уфа, 2005. - 22 с.
23. Панок К.К., Саранчук Л.И. Нагарообразование и термическая стабильность авиационных масел. - М.: Аэрофлот, 1946. - 146 с.
24. Доценко, Г.Н. Разработка принципов очистки деталей авиационной техники от нагароподобных загрязнений биотехнологическим методом : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.22.14 / Доценко Галина Николаевна. - Москва, 2000. - 37 с.
25. Шулов В.А., Быценко О.А., Теряев Д.А. и др. Разработка технологического процесса восстановления свойств лопаток компрессора ГТД из жаропрочной стали ЭП866-Ш с применением сильноточных импульсных электронных пучков // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 8-ой международной конференции / Беларусь. - Минск, 2009. - С. 360-362.
26. Stalder J.P. Gas turbine compressor washing state of the art: field experiences // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. - 2001. - Vol. 123. - P. 363-370.
27. Bouris D. et al. Numerical comparative study of compressor rotor and stator blade deposition rates // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. - 2002. - Vol. 124, № 4. - P. 608-616.

28. Китаев, С.В. Повышение энергетической эффективности работы газоперекачивающих агрегатов : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 25.00.19 / Китаев Сергей Владимирович. - Уфа, 2003. - 22 с.
29. Ванчин А.Г. Экспресс-метод определения степени загрязненности двухвального осевого компрессора ГТУ в составе ГПА // Газовая промышленность. - 2013. - № 2. - С. 33-34.
30. Межеричкий А.Д. Механизм загрязнения и очистка проточных частей компрессоров энергетических установок. - М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1989. - 30 с.
31. Вахрушев Е.С. Промывка ГВТ двигателя - одно из важнейших условий сохранения его эффективности [Электронный ресурс] URL: [http://www.pnz.ru/pr/other/ntex/ib15\\_3/ib15\\_20-21/](http://www.pnz.ru/pr/other/ntex/ib15_3/ib15_20-21/) (дата обращения: 11.04.2016)
32. Zwebek, A., Pilidis, P. Degradation effects on combined cycle power plant performance - Part II: steam turbine cycle component degradation effects // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. - 2003. - Vol. 125. - P. 658-663
33. Zwebek, A., Pilidis, P. Degradation effects on combined cycle power plant performance - Part III: gas and steam turbine component degradation effects // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. - 2004. - Vol. 126. - P. 306-315.
34. Zwebek, A., Pilidis P. Degradation effects on combined cycle power plant performance - Part I: gas turbine cycle component degradation effects // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2004. - Vol. 125. - P. 651-657.
35. Ogbonnaya E.A. Gas Turbine performance optimization using compressor online water washing technique // Engineering. - 2011. - № 3. - P. 500-507
36. Газотурбинные установки для транспорта природного газа: Учебное пособие / А.В. Рудаченко, Н.В. Чухарева. - Томск: Томский политехнический университет, 2012. - 213 с.

37. Ujam A. J., Ekere P. O., Chime T. O. Performance evaluation of a gas turbine power plant by the application of compressor off-line and on-line water washing techniques (A case study of 450MW sapele power station in delta state, Nigeria) // IOSR Journal of Engineering. - 2013. - Vol. 3, Issue 11. - P. 29-41.
38. Hovland G., Antoine M. Scheduling of gas turbine compressor washing // Intelligent Automation & Soft Computing. - 2006. - Vol. 12, Issue 1.- P. 63-73.
39. 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.
40. Meher-Homji C. B., Bromley A.F. Gas turbine axial compressor fouling and washing // Proceedings of the thirty-third turbomachinery symposium / A&M University, USA. - Texas, 2004. P. 163-191.
41. Modern gas turbine systems: high efficiency, low emission, fuel flexible power generation / ed. by P. Jansohn. Woodhead Publishing, 2013. - 838 p.
42. Razak A.M.Y Industrial gas turbines: performance and operability. CRC Press, 2007. - 624 p.
43. Hovland G.E., M. Antoine M. Economic optimization of gas turbine compressor washing // Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference 2004 / The Australasian Universities Power Engineering Conference. - Brisbane, 2004. - P. 78-83.
44. Boyce M .P., Gonzalez F. A study of on-line and off-line turbine washing to optimize the study of a gas turbine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. - 2007. - Vol. 129, № 1. - P. 114-122.
45. 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.
46. Aiad G. Cascade testing and CFD applied to gas turbine performance improvement with compressor cleaning : PhD Thesis : School of engineering.



Department of power, propulsion and aerospace engineering / Aiad Gannan ; Cranfield University. - Great Britain, 2010. - 275 p.

47. Техническая эксплуатация судовых газотурбинных установок / Под ред. Г.Ш. Розенберга. М.: Транспорт, 1986. 222 с.
48. Судовые паровые и газовые турбины и их эксплуатация: Учебник / Л.И. Слободянюк, В.И. Поляков. - Л.: Судостроение, 1983. - 360 с.
49. Способ очистки проточной части газотурбинного двигателя [Текст] : пат. 2280773 Рос. Федерация : МПК F 02 C 7/30 / Новиков В.В.; Шитарев И.Л.; Перепелица А.Н.; Прошунин В.А.; Елизаров И.А.; заявитель и патентообладатель Новиков Василий Васильевич - № 2005103849/06; заявл. 15.02.2005; опублик. 27.07.2006, Бюл. №21. - 5 с.
50. Способ сухой очистки поверхностей лопаток компрессора [Текст] : пат. 2513525 Рос. Федерация : МПК F 04 D 29/70 / Губин Г.П.; заявитель и патентообладатель Губин Геннадий Петрович. - № 2012136512/06; заявл. 24.08.2012; опублик. 20.04.2014, Бюл. №11. - 9 с. : ил.
51. Тренин В.М. Система промывки высокого давления для компрессора ГТУ // Турбины и дизели. - 2008. - №1. - С. 22 - 25. URL: [http://www.turbine\\_diesel.ru](http://www.turbine_diesel.ru) (дата обращения: 12.04.2016)
52. Установка для промывки и эмульсирования воздушно-газового тракта газотурбинного двигателя [Текст] : пат. 2323051 Рос. Федерация : МПК В 08 В 3/02 / Карась Л.В., Муштаков Г.Г., Локай Л.В. и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Заречье». - №2006129387/12 заявл. 04.08.2006; опублик. 27.04.2008, Бюл. № 12. - 20 с. : ил.
53. Системы очистки компрессоров газовых турбин // Turbotect Limited [сайт]. URL: <http://turbotect.ru/systems/index.html> (дата обращения: 15.04.2016)
54. 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](http://www.turbine_diesel.ru) (дата обращения: 12.04.2016)

55. Axial compressor on/off-line washing // GE oil and gas [сайт] URL: [http://site.ge-energy.com/businesses/ge\\_oilandgas/en/literature/en/downloads/onoffline\\_washing.pdf](http://site.ge-energy.com/businesses/ge_oilandgas/en/literature/en/downloads/onoffline_washing.pdf) (дата обращения: 12.04.2015 г.)
56. Syverud, E. Axial compressor performance deterioration and recovery through online washing : PhD Thesis : Department of Energy and Process Engineering / Elisabet Syverud; Norwegian University of Science and Technology. - Norway, 2007. - 143 p.
57. Syverud E., Brekke O., Bakken, L. Axial compressor deterioration caused by saltwater ingestion // J. of Turbomachinery. - 2007. - Vol. 129, № 1. - P. 119-126.
58. Syverud, E., Bakken, L.E., Online water wash test of GE J85-13 // J. of Turbomachinery. - 2007. - Vol. 129, № 1. - P. 136-142.
59. Kurz R., Brun K., Mokhatab S. Gas turbine compressor blade fouling mechanisms // Pipeline & Gas Journal. - 2011.- Vol. 238, № 9 . - P. 18- 21.
60. Brun K., Kurz R., Folles W. Experimental evaluation of the effectiveness of online water washing in gas turbine compressors // ASME/IGTI: Proceedings of the forty-second turbomachinery symposium. USA, Houston, 2013. - 18 p.
61. Igie U., Pilidis P., Fouflias D. at al Industrial gas turbine performance: compressor fouling and on-line washing // Journal of Turbomachinery. - 2014. - Vol. 136, Issue 10. - 13 p.
62. Wilkinson P., Shark L. Automatic monitoring of gas turbine air intakes using colour imaging techniques // Insign – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. - 2004. - Vol. 46, № 2. - P. 94-97.
63. Плазменные покрытия (свойства и применение): Учебное писание / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Сольвьев. - Томск: ТПУ, 2011. - 136 с.
64. Способ подготовки поверхности металлических деталей к оперативному выявлению прижогов измерением работы выхода электрона [Текст] : 2488093 Рос. Федерация : МПК G 01 N 13/00 / Олешко В.С. ; заявитель и

патентообладатель Олешко Владимир Станиславович - № 2011149111/28; заявл. 02.12.2011; опублик 20.07.2013, Бюл. №20. - 6 с.

65. Самойленко В.М., Олешко В.С. Применение прибора измерения контактной разности потенциалов «Поверхность-11» в неразрушающем контроле деталей машин // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. - 2011. - № 2.- С. 3 - 6.
66. Быценко О.А., Олешко В.С., Пайкин А.Г. О подготовке деталей машин к оперативному измерению контактной разности потенциалов // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. - 2014. - № 1. - С. 60 - 63.
67. 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.
68. Установки для струйной очистки // АО "Сервис Промышленных Энергетических и Нефтегазовых Систем" (СПЭНС) [сайт] URL: <http://www.agd-russia.ru> (дата обращения: 15.04.2016)
69. 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.
70. Очистка сухим льдом // ООО "Керхер" [сайт] URL: <https://www.karcher.ru/ru/professional/ochistka-sukhim-ldom.html> (дата обращения: 17.03.2016)
71. Чистка с использованием сухого льда (бластинг) // ООО «Елме Мессер К» [сайт] URL: [http://www.elmemesser.ru/ru\\_RU/use-cases/industry/dry-ice](http://www.elmemesser.ru/ru_RU/use-cases/industry/dry-ice) (дата обращения: 22.03.2016)
72. 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.

73. Макеев Р. И., Толкачёв А. В. Виброполировальная обработка в современном технологическом процессе // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2006. - №4 (16). - С.49-50.
74. 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
75. Вейко В.П., Кишалов А.А., Мутин Т.Ю. и др. Перспективы промышленных применений лазерной очистки материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2012. - № 3 (79). - С. 50-54
76. Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н. и др. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для восстановления эксплуатационных свойств лопаток газотурбинных двигателей // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. - 2014. - № 1. - С. 43-49.
77. Способ восстановления эксплуатационных свойств деталей машин [Текст] : 2281194 Рос. Федерация : МПК В 23 Р 6/00 / Белов А.Б., Пайкин А.Г., Новиков А.С., Львов А.Ф., Энгелько В.И. ; заявитель и патентообладатель ОАО «ММП им. В.В. Чернышева» - № 2005106045/02; заявл. 04.03.2005; опублик. 10.08.2006, Бюл. № 22. - 10 с. : ил.
78. Пайкин А. Г. и др. Перспективные технологии обработки поверхности при изготовлении и ремонте лопаток ГТД из титановых сплавов с применением мощных ионных и сильноточных электронных пучков // Физика и химия обработки материалов. - 2007. - № 3. - С. 44-56.
79. Шулов В.А., Ремнев Г.Е., Ночовная Н.А. и др. Физико-химические процессы, протекающие в поверхностных слоях титановых сплавов при

ионно-лучевой обработке с использованием импульсных пучков // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1993. - № 5. С. 127-140.

80. Биотехнологический способ очистки деталей техники от загрязнений [Текст] : 2146293 Рос. Федерация : МПК С 12 S 9/00, С 12 N 1/26, С 12 S 9/00 Доценко Г.Н.; Феофилова Е.П.; Терешина В.М.; Меморская А.С.; заявитель и патентообладатель Доценко Галина Николаевна. - № 99113697/13 заявл. 21.06.1999; опубл. 10.03.2000