

### Конкурсная работа.

Номинация: «За создание новой технологии»

Название работы: «Разработка технологии и оборудования для удаления керамических стержней из внутренних полостей литых охлаждаемых лопаток ГТД методом комплексной ультразвуковой гидро- и химикотермической обработки»;

Соискатели: ПК «Салют» АО «ОДК» (В.А. Михайлов), ООО «РусТурбоТехнологии» (С.С. Кацуба).

### Описание проблемы и ее актуальности для отрасли.

Реализация проекта по разработке новой технологии удаления керамических стержней направлена на решение проблемы качественной и безопасной очистки турбинных охлаждаемых (пустотелых) лопаток от керамического материала, а именно удаление литейного керамического стержня, формирующего будущую внутреннюю полость турбинной лопатки, которая, в свою очередь, служит для ее охлаждения в процессе работы и увеличения ресурса и мощности реактивного двигателя. После того как лопатки изготовят методом точного литья по выплавляемым моделям, керамические стержни необходимо удалить из отливок для формирования внутренней полости. Керамический стержень очень трудноудаляемый, т.к. толщина каналов внутренней полости составляет от 0,1 мм до нескольких миллиметров, а длина от 20 до 300 мм, чаще всего выполнен в виде сложной многоканальной циклонно-вихревой матрицы

Основной проблемой в рассматриваемой отрасли РФ является вынужденный отказ от старой технологии в 2005-2010 г., применявшейся со времен СССР, по удалению керамических стержней в би-фториде или три-фториде калия, из-за образования токсичного фтористого водорода и запрета надзорных и контрольных служб на сброс остатков продуктов реакции в систему водоотведения. Кроме того, новые современные виды лопаток нельзя очищать старым советским способом, т.к. агрессивный раствор би-фторида калия приводит к высокой величине растравливания внутренней поверхности и возможному браку самих отливок. Допустимая величина растравливания внутренней поверхности лопатки заложена разработчиками изделия и регламентируется директивными документами (чертеж, технические условия). Максимальная шероховатость внутренней поверхности (величина растравки) после операции очистки не должна превышать  $Rz=40$  мкм, а в современных лопатках эта величина уменьшена до  $Rz=20$  мкм. Старая технология удаления керамики не позволяет выдерживать новые требования и стандарты изготовления турбинных лопаток, т.к. величина растравки составляет выше 20 мкм, что может привести к браку изделий.

Зарубежные аналоги оборудования предназначены для удаления стержней на основе плавного кварца и не способны удалить стержни на основе электрокорунда, который является основным материалом производства стержней в России. Ограниченность зарубежного оборудования в выполнении качественной очистки лопаток объясняется тем, что удаление электрокорундовых стержней происходит при более интенсивных режимах, чем кварцевых. Недостатками зарубежного оборудования, наряду с низкой технологической пригодностью в условиях российского производства и ограниченной номенклатурой обрабатываемых деталей, является опасность производства из-за фактора

высокого давления (до 50 атм.), а также значительная стоимость оборудования (более 1 млн. евро), его монтажа и эксплуатации.

Недостатками отечественных аналогов оборудования, с учетом их дефицита, являются опасные факторы производства: высокие закритические рабочие значения давления и температуры сосудов (свыше 200 атм. и 400 °С, соответственно). Процесс производства, сертификации, монтажа и обслуживания данного оборудования очень сложный и дорогостоящий. Отсутствие комплексной автоматизации оборудования в условиях ручной работы с концентрированными щелочными растворами увеличивает вредность для рабочего персонала. Сложность операции заключается в соблюдении условий полной очистки и минимального воздействия на обрабатываемое изделие.

Рассмотрение вопроса перехода на новые стержневые смеси (из плавленного кварца) и использование зарубежного оборудования, предназначенного для его удаления, является невозможным в сложившихся условиях. Кварцевый материал в России дефицитен и переход будет очень затратным: необходимо будет менять всю оснастку (пресс-формы для изготовления стержней), т.к. характеристики (усадка, прочность) кварца и электрокорунда разные. Другой причиной невозможности перехода является тот факт, что лопатки с монокристаллической структурой невозможно изготовить с кварцевыми стержнями, т.к. они не способны выдерживать длительные термические нагрузки при заливке и кристаллизации (свыше 1600 °С). На данный момент целесообразнее и дешевле разработать новый способ удаления стержней, чем переходить на новую стержневую смесь.

Предлагаемое решение состоит в создании технологического комплекса для удаления керамических стержней, основой которых является высокопрочный электрокорундовый керамический материал, из внутренних полостей литых охлаждаемых лопаток ГТД методом комплексной ультразвуковой, гидро- и химико-термической обработки.

### Краткое описание инновационности подхода.

Ноу-хау технологии заключается в применении ультразвука в сочетании с гидро- и химикотермической обработкой, проведении предварительного вакуумирования и промежуточных промывок для увеличения скорости удаления керамического стержня, а также в эффективной интеграции технологических решений и стадий в процессе всей операции очистки (аналоги не имеют данных решений, основной подход аналога заключается в применении очень высоких, закритических значений давления и температуры). Ультразвуковая кавитация интенсифицирует воздействие щелочного раствора на керамический стержень, для сокращения времени его удаления, снижения себестоимости и повышения качества операции. Наряду с применением ультразвукового воздействия для интенсификации процесса другим эффективным решением является предварительное вакуумирование камеры автоклава с отливками в начале операции с последующим нагнетанием щелочного раствора, которое способствует более глубокому проникновению щелочи в стержень и его разупрочнению, т.к. стержень имеет пористую структуру. Имеющийся воздух в порах стержня при вакуумировании откачивается и на его место проникает щелочной раствор.

Другим инновационным решением является введение промежуточных промывок внутренних полостей отливок для уменьшения времени процесса очистки. Керамический стержень разупрочняется при взаимодействии с щелочью не сразу, постепенно, при этом образовавшиеся продукты взаимодействия керамики с щелочью в виде кашеобразной массы (шлама), который препятствует дальнейшему растворению стержня и снижает скорость реакции. При промежуточных промывках с удалением образовавшихся слоев керамической массы значительно увеличивается скорость удаления керамического стержня. В аналогах оборудования промежуточные промывки невозможны, т.к. из-за высоких значений давления и температуры существует необходимость снижения температуры и давления перед открытием (разгерметизацией) автоклава, которое занимает существенное время (~120...150 минут).

Преимуществом по сравнению с отечественными аналогами заключается в снижении давления в автоклаве в 12,5 раз (20 атм. против 250 атм.), по сравнению с мировыми аналогами в 2,5 раза (20 атм. против 50 атм.) для снижения опасности производства и уменьшения себестоимости проведения операции. Высокая степень автоматизации решает проблему безопасности труда и производственной деятельности, расширяет технологические возможности и номенклатуру обрабатываемых изделий. Система управления обеспечивает автоматизированную и скоординированную работу всех элементов системы. Предлагаемый способ позволяет эффективно очищать изделия не только с кварцевыми, но и с современными высокопрочными электрокорундовыми стержнями со сложной пространственной геометрией.

Главными преимуществами по сравнению с аналогами является:

- повышение безопасности, уменьшения давления в 15 раз по сравнению с отечественными аналогами (15 атм. против 225 атм.) за счет применения новых решений: ультразвуковое воздействие, предварительное вакуумирование, промежуточные промывки, колебания модульной оснастки с отливками;
- снижение производственной вредности за счет автоматизации процесса (в настоящее время в аналоге все операции по приготовлению, заливке и утилизации концентрированных щелочных растворов производится вручную, автоматизация отсутствует);
- уменьшение себестоимости операции за счет повторного использования щелочных растворов и снижения времени операции;
- повышение качества операции за счет уменьшения вредного воздействия на обрабатываемые отливки и создания системы эффективной промывки внутренних полостей лопаток с высокой степенью автоматизации;
- увеличение производительности за счет уменьшения времени очистки и возможности установки дополнительных силовых блоков в состав комплекса (у аналогов конструкционно заложено два реактора, увеличить их количество невозможно, что ограничивает производительные возможности оборудования).

### Описание технологии.

Силовой блок изображен на рис.1 (см. прил. 1) в виде совокупности технических устройств, имеющих основные части: поз. 1 – корпус автоклава, поз. 2 – охлаждаемый блок, поз. 3 – змеевик охлаждения, поз. 4 – крышка, поз. 5 – датчик уровня жидкости, поз. 6 – клапан нагнетания инертного газа, поз. 7 – баллон со сжатым инертным газом, поз. 8 –

катушка индуктивности (соленоид), поз. 9 – магнитный сердечник, поз. 10 – модульная корзина, поз. 11 – щелочной раствор, поз. 12 – теплоэлектронагреватели, поз. 13 – ультразвуковой волновод, поз. 14 – ультразвуковой преобразователь, поз. 15 – изолированный участок трубопровода нагнетания и слива раствора, поз. 16 – задвижка, поз. 17 – газоохладитель, поз. 18 – влагоотделитель, поз. 19 – клапан сброса давления, поз. 20 – клапан вакуумирования, поз. 21 – вакуумный насос, поз. 22 – обрабатываемая отливка, поз. 23 – модули крепления.

Основной частью силового блока является корпус автоклава (реактора) 1 в виде цилиндрической камеры, изготовленной из нержавеющей металла. Внутри автоклава располагается модульная корзина 10 с обрабатываемыми деталями, погруженными в жидкий щелочной раствор 11, где происходит основной процесс растворения керамики в щелочном растворе.

В предпочтительных вариантах силовой блок технологического комплекса, где происходит основное растворение и удаление керамического материала работает следующим образом.

Обрабатываемые отливки 22 загружаются и закрепляются в модули крепления 23 (см. прил. 2), которые затем стягиваются с помощью зажимных механизмов. Количество модулей крепления 23 (например, 3 шт.) и обрабатываемых отливок 22 в каждом из них зависит от геометрических размеров отливок и размера автоклавной камеры. Модуль крепления представляет собой технологическое приспособление (оснастку) для упорядоченного расположения и закрепления обрабатываемых отливок 22 с целью проведения дальнейших операций очистки, промывки и межоперационного транспортирования. Модуль крепления состоит из нескольких частей, в каждой из которых расположены посадочные места для отливок, части модуля скрепляются или стягиваются между собой после загрузки отливок для фиксации отливок в модуле. Модули крепления 23 в свою очередь помещают в модульную корзину 10, закрепляют и в составе корзины загружают в пустую камеру автоклава. После закрытия крышки 4 проводится предварительное вакуумирование камеры с отливками при открытии клапана вакуумирования 20 и включения вакуумного насоса 21. Предварительное вакуумирование необходимо для создания давления в камере и порах керамики ниже атмосферного, т.к. керамика, заполняющая внутреннюю полость обрабатываемых изделий, имеет пористую структуру. При достижении требуемого значения вакуума закрывается клапан вакуумирования 20, отключается вакуумный насос 21, открывается задвижка 16 и через изолированный участок трубопровода нагнетания и слива раствора 15 происходит подача щелочного раствора в камеру и пропитывание керамики подаваемым раствором. Приготовление щелочного раствора (например, концентрированный раствор гидроксида калия - КОН) и подготовка к нагнетанию происходит в составе технологического комплекса – системе для приготовления, хранения и транспортировке щелочного раствора. При достижении требуемого уровня раствора происходит касание раствора с датчиком уровня жидкости 5 и при срабатывании последнего происходит нагнетание инертного газа для увеличения давления в камере до атмосферного. После закрытия задвижки 16 и открытия клапана нагнетания инертного газа 6 происходит подача газа из баллона со сжатым инертным газом 7 в камеру до требуемого значения давления. Затем включаются теплоэлектронагреватели 12 и нагревается щелочной раствор 11 до рабочих температур. подача щелочного раствора в камеру может быть реализована, в том числе, с

помощью механизма дозирования раствора, когда в камеру подается заранее приготовленный раствор заданного объема. В этом случае происходит автоматическое прекращение подачи раствора.

Верхняя цилиндрическая часть представлена в виде охлаждаемого блока 2 со спиральным змеевиком охлаждения 3. Верхняя часть реализована охлаждаемой с целью уменьшения термических расширений металла в зоне уплотнения съемной крышки 4 при нагреве. Крышка 4 имеет дополнительную герметичную полу цилиндрическую часть, основной целью которой является уменьшения внутреннего объема газовой части камеры и экономии объема нагнетаемого инертного газа в камеру. В процессе очистки возможно открытие крышки автоклавной камеры для извлечения модульной корзины 10 с отливками для проведения промежуточных промывок внутренних полостей обрабатываемых изделий с целью удаления шламообразной массы (продуктов реакции керамики и щелочной жидкости) и обратной загрузки модульной корзины 10 для продолжения операции очистки.

Для повышения интенсивности растворения прочной керамики и сокращения времени проведения операции очистки наряду с растворением в растворе щелочи при повышенном давлении и температуре дополнительно происходит ультразвуковое и вибрационное воздействия. Ультразвуковое воздействие реализовано с помощью системы ультразвукового воздействия, а именно: ультразвукового преобразователя 14 и ультразвукового волновода 13, который излучает и распространяет ультразвуковые колебания высокой частоты в жидкой щелочной среде. Возникает процесс кавитации и образование множества мельчайших микропузырьков, которые при взаимодействии с керамикой значительно повышают эффективность ее разрушения и растворения. Вибрационное воздействие реализовано с помощью системы колебаний (вертикальных встряхиваний) модульной корзины 10 с отливками. При подаче тока с генератора импульсов электровозбудителя на катушку индуктивности (соленоид) 8, под действием электромагнитного поля модульная корзина 10 с отливками совершает вертикальные перемещения (подскакивает) во время операции с помощью магнитного сердечника 9 за счет подаваемых на магнитный сердечник импульсов, изготовленный из ферромагнитного материала. Корпус автоклава 1 изготовлен из нержавеющей стали, обладающего низкой магнитной восприимчивостью, поэтому практически вся сила возникающего магнитного поля направлена на сердечник модульной корзины, который покрыт нержавеющей сталью для защиты от коррозии в щелочной среде. Силы магнитного поля достаточно, чтобы сквозь стенки автоклава привести в движение магнитный сердечник 9, а, следовательно, и всю модульную корзину 10 с отливками. Реализация описанного способа позволяет приводить в движение обрабатываемые изделия внутри герметичной камеры, находящейся под давлением, без прямого механического контакта генератора колебаний с модульной корзиной 10 и обрабатываемыми изделиями. Т. к. продукты реакции керамического материала и щелочного раствора могут препятствовать дальнейшему попаданию щелочного раствора внутрь отливки и замедлять реакцию, то создание вертикальных колебаний способствует увеличению интенсивности попадания и притоку нового щелочного раствора во внутренние полости отливок, в том числе глухие и труднодоступные каналы. Система колебаний позволяет интенсифицировать процесс размягчения и растворения керамического материала за счет поступающего щелочного раствора во внутренние каналы отливок, щелочной раствор в каналах обрабатываемых

изделий обновляется. Колебания увеличивают скорость извлечения («вытряхивания») остатков растворенной керамики из внутренних полостей наружу, давая возможность поступлению и доступа свежего щелочного раствора к керамическому материалу, находящегося во внутренних труднодоступных полостях и каналах отливок. Кроме того, колебания модульной корзины 10 с отливками способствуют перемешиванию щелочного раствора в автоклавной камере.

Спуск давления осуществляется при открытии клапана сброса давления 19 с прохождением газоохладителя 17 и влагоотделителя 18. При испарении раствора пары будут конденсироваться в газоохладителе и обратно попадать в автоклавную камеру.

Описанный способ удаления керамического материала по вышеописанному изобретению позволяет снизить опасные факторы производства за счет снижения верхнего рабочего значения давления аналогов в 22 МПа до максимального значения разработанного оборудования в 1,5...2 МПа. В том числе, за счет снижения минимального значения давления в камере, реализованного с помощью создания давления в автоклавной камере ниже атмосферного (вакуума), удастся эффективно проводить операцию очистки при снижении максимального значения давления.

Важной особенностью разработанного оборудования является возможность автоматической подачи и слива щелочного раствора в камеру. Автоматическая подача и слив щелочного раствора при повышенных температурах исключает прямой контакт оператора оборудования с концентрированным щелочным раствором, значительно улучшаются санитарно-гигиенические условия труда, уменьшаются вредные и опасные факторы производства.

Другим важным аспектом оборудования является возможность осуществления высоконапорной промывки обрабатываемых изделий в любой момент осуществления операции растворения и удаления керамики в щелочном растворе. Практическое выполнение данного решения возможно осуществить при условии безопасного извлечения обрабатываемых изделий, их последующей промывки на гидродинамической установке и дальнейшей загрузки обратно в реактор. Описанные условия наиболее эффективно возможно реализовать с помощью упорядоченной установки и жесткого закрепления обрабатываемых изделий в модульные корзины, а затем обрабатывать и совершать все межоперационные перемещения изделий в составе модульных корзин. В противном случае, придется жестко закреплять каждую деталь при промывке в приспособление для зажима, т.к. при промывке высоконапорная струя действует с силой, но закрепление деталей вручную, каждую по отдельности, повлечет за собой значительное увеличение трудоемкости операции, а также ухудшение санитарно-гигиенических условий труда (детали при извлечении из горячего щелочного раствора находятся при высоких температурах). С помощью упорядоченного расположения обрабатываемых изделий и их жесткого закрепления становится возможным проведение дополнительных операций, управление и контроль за состоянием изделий во время всей операции очистки; это также позволяет наиболее эффективно использовать внутренний объем автоклавной камеры с более плотным упорядоченным расположением изделий. В имеющихся на сегодняшний день аналогах оборудования загрузка деталей происходит без упорядоченного расположения («россыпью»), что снижает эффективность процесса, т.к. на изделия оказывается только химическое воздействие в виде растворения керамики в щелочном растворе, в то время как в предлагаемом устройстве происходит

комбинированное воздействие химикотермических (растворение в щелочном растворе) и гидродинамических (осуществление высоконапорной промывки) факторов в течение одной операции.

Извлечение модульной корзины 10 с отливками во время проведения операции позволяют проводить промывки на гидродинамической машине для очистки продуктов реакции керамического материала с щелочным раствором (керамического шлама) для увеличения скорости растворения керамического стержня в щелочном растворе. Упорядоченное и жесткое закрепление отливок позволяет проводить загрузку, извлечение и проведение промывки отливок в составе модульной корзины 10, тем самым расширяя технологические возможности операции очистки.

Осуществление промывок внутренних полостей обрабатываемых изделий позволяет сократить общее время проведения операции очистки отливок от керамики. С помощью высоконапорной промывки удастся удалить керамику из внутренней полости с большей скоростью, чем без осуществления промывки. В случае проведения операции без осуществления промывки единственным фактором для удаления керамики служит только наличие щелочной среды. Описанный способ предполагает комбинированное воздействие различных факторов: щелочной среды, с внедрением новых решений (ультразвуковое воздействие, создание колебаний), а также проведение высоконапорных промывок. Комбинация факторов подобрана таким образом, чтобы максимально сократить время проведения операции, снизить предельные значения давления и температуры, повысить качество проведения операции. Конкретный режим очистки определяется типом обрабатываемых изделий, когда для определенного вида отливок подбирается режим в зависимости от состава керамического материала и сплава, из которого изготовлена отливка, с целью повышения эффективности операции очистки.

За счет сокращения времени нахождения изделий в щелочном растворе и уменьшения общей продолжительности проведения операции, а также снижения рабочих температуры и давления повышается качество очистки. Становится возможным проведение очистки отливок без растравливания необрабатываемой внутренней поверхности отливок или с существенным уменьшением значения глубины растравливания. Глубина растравливания, в основном, зависит от максимальной температуры, концентрации щелочного раствора и времени нахождения обрабатываемых изделий в щелочном растворе. Описанный способ позволяет снизить значения основных параметров, от которых зависит глубина растравливания и, таким образом, повысить качество операции очистки. Также существенно уменьшается вероятность бракования изделий, т.к. при превышении глубины растравливания, изделие бракуется по причине невозможности исправления дефекта (очищаемая внутренняя поверхность является необрабатываемой).

## Описание испытаний.

Для подтверждения эффективности описанных решений, надежности работы и высокого качества проведения операции очистки, были спроектированы и изготовлены опытно-промышленный и промышленный единицы оборудования.

Обработка состояла в проведении 5 технологических циклов удаления керамических стержней в ООО «РусТурбоТехнологии» с последующим проведением в ПК «Салют» АО «ОДК» рентгеноконтроля на отсутствие остатков керамического материала и металлографических исследований для определения глубины растрова внутренних поверхностей отливок лопаток.

Циклы очистки проводились по различным технологическим параметрам в автоматическом режиме с возможностью ручной регулировки. Работы проводились в следующем порядке:

1. **Сушка лопаток** в сушильном шкафу ШС-80-02-СПУ с принудительной конвекцией воздуха при температуре 60 °С в течение 30 мин. (см. рис. 1).



Рис. 1. Сушильный шкаф ШС-80-02-СПУ.

Предварительная сушка перед вакуумированием и проведением основного цикла очистки проводилась с целью удаления в керамическом стержне остатков влаги, в случае образования конденсата и его впитывания в керамический материал.



## 2. Загрузка лопаток в модульные корзины (см. рис.2).

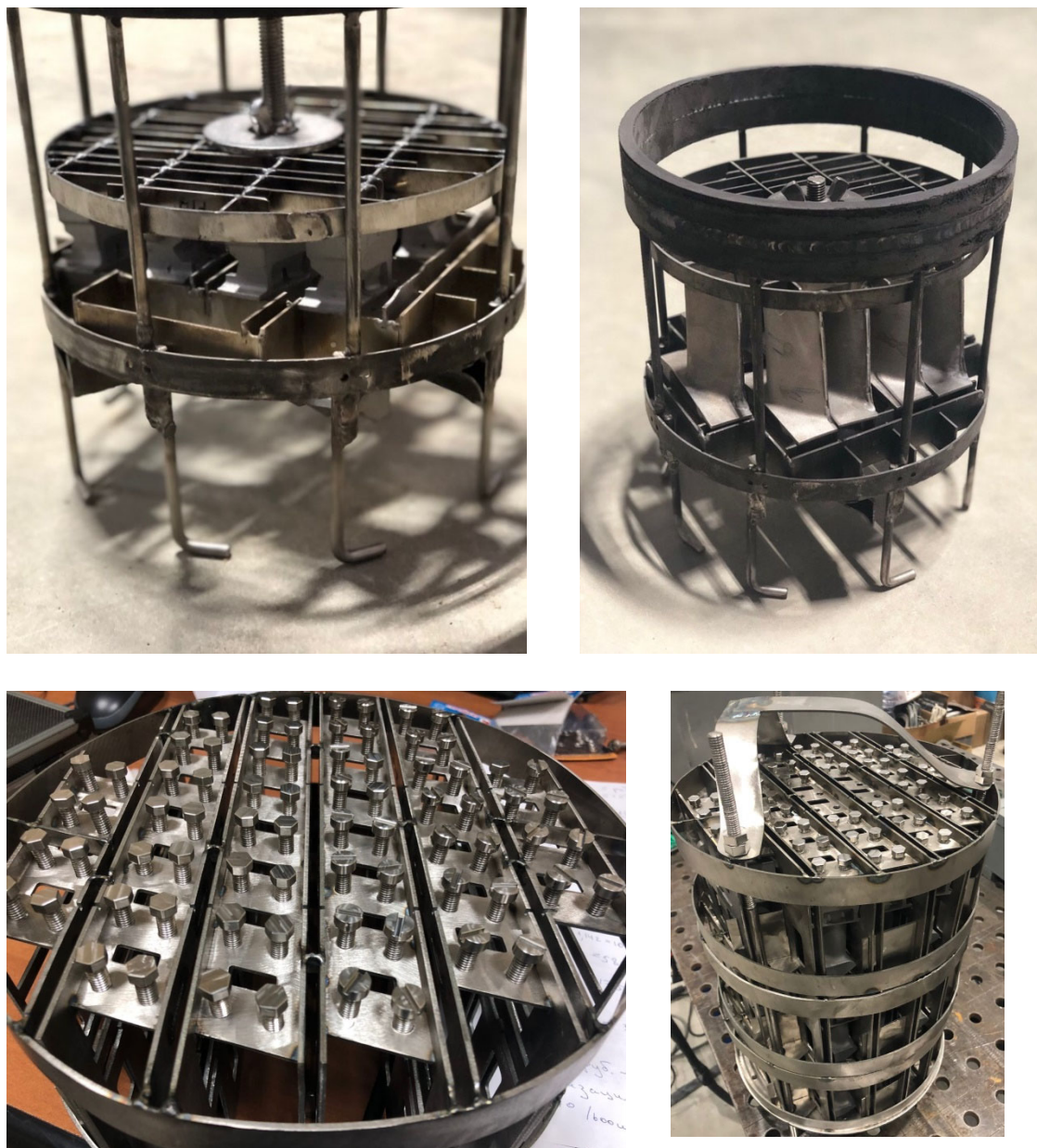


Рис. 2. Загрузка и закрепление лопаток в модульных корзинах.

## 3. Приготовление водного раствора щелочи КОН.

Приготовление щелочного раствора производилось в следующем порядке:

- 3.1. Заливка отмеренного объема дистиллированной воды в емкость для приготовления щелочного раствора (рис. 3);
- 3.2. Включение химического насоса для осуществления циркуляции жидкого раствора;

- 3.3. Взвешивание на электронных весах сухой щелочи КОН;
- 3.4. Засыпка сухой щелочи в емкость для приготовления щелочного раствора.  
При этом температура раствора возрастает до 90 °С за счет выделения тепла при смешивании щелочи с водой, т.к. реакция является экзотермической;
- 3.5. Перемешивание щелочного раствора в течение 10 мин после растворения сухой щелочи в воде.

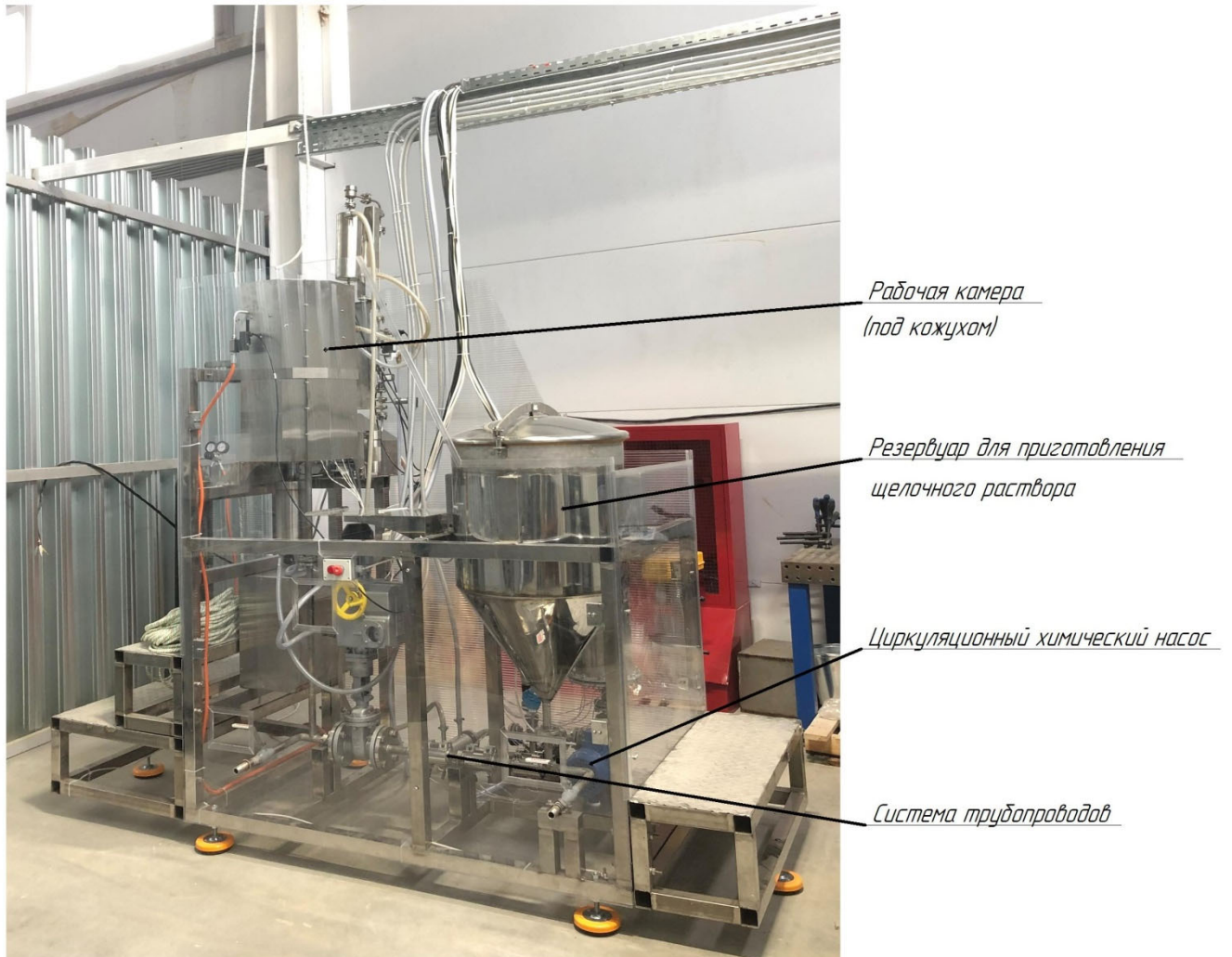


Рис. 3. Силовой блок технологического комплекса.

#### 4. Проведение основного цикла очистки.

- 4.1. Загрузка корзины с отливками в рабочую камеру;
- 4.2. Предварительное вакуумирование рабочей камеры с помощью вакуумного насоса до остаточного давления 3,1 мБар (см. рис. 4);
- 4.3. Нагнетание щелочного раствора в рабочую камеру;
- 4.4. Нагрев щелочного раствора в рабочей камере и напуск давления с помощью инертного газа – азота;
- 4.5. Включение ультразвукового воздействия частотой 22 кГц, создание колебаний корзины с отливками и колебаний давления по режиму (см. рис. 5);

**Технологический цикл №1** «Лопатка рабочая ТВД» 99.04.02.325(790) – 10 шт.

Соотношение вода (л): щелочь (кг)	10:24
Глубина вакуума	до 3,09 мБар
Рабочее давление	10...14 бар
Температура	180 °С
Суммарное время нахождения лопаток в щелочном растворе	6 ч 17 мин
Период колебаний давления	5 мин
Период колебаний корзины с отливками	1 мин



Рис. 4. График значений давления при проведении предварительного вакуумирования рабочей камеры с загруженными в составе корзины отливками.

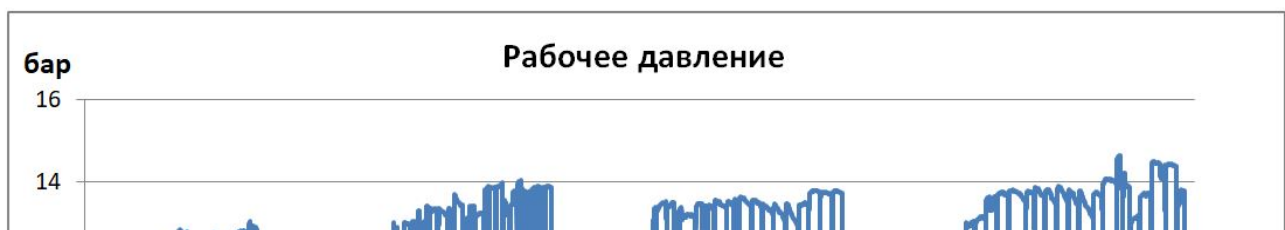


Рис. 5. График рабочего давления технологического цикла №1.

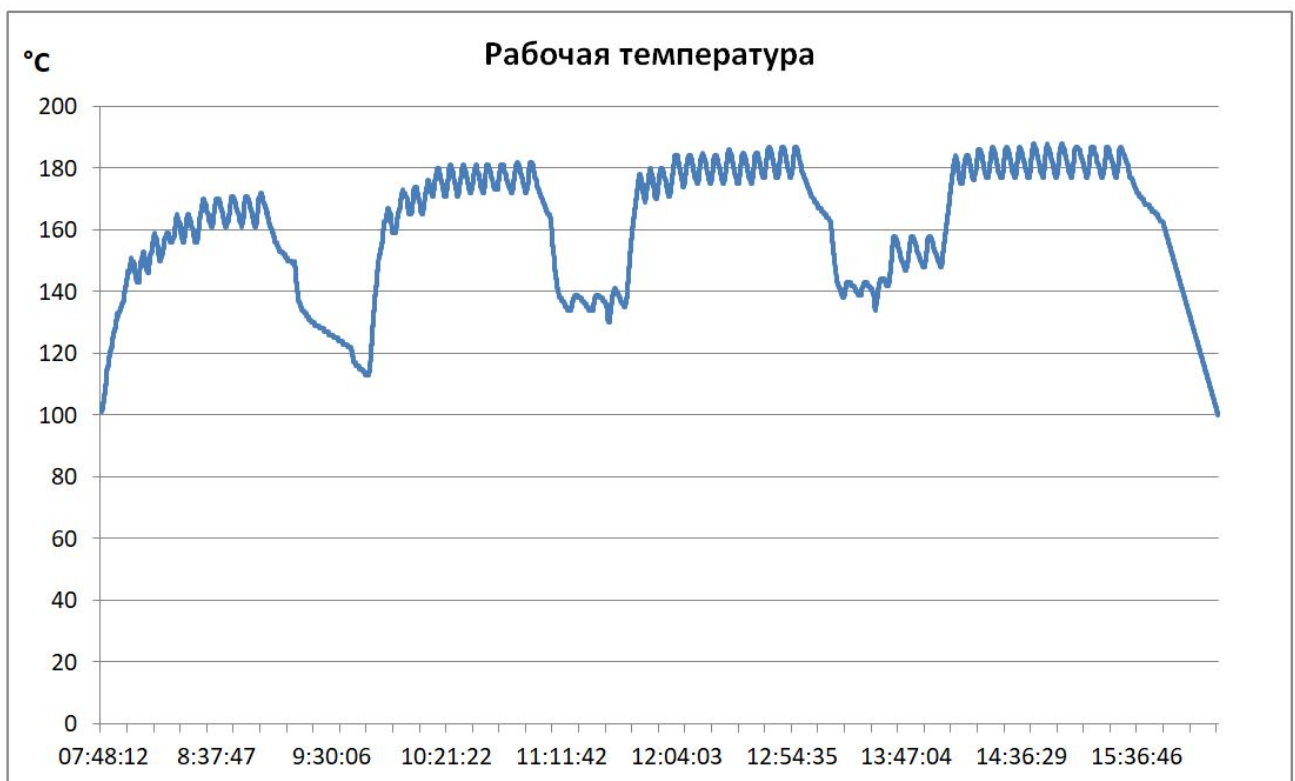


Рис. 6. График рабочей температуры технологического цикла №1.

Наблюдение и контроль за работой оборудования осуществлялся в автоматическом режиме с интерактивного экрана ПК с помощью автоматической системы управления технологическим процессом (АСУТП) (см. рис. 7). В случае необходимости осуществлялась корректировка задаваемых параметров технологического процесса.

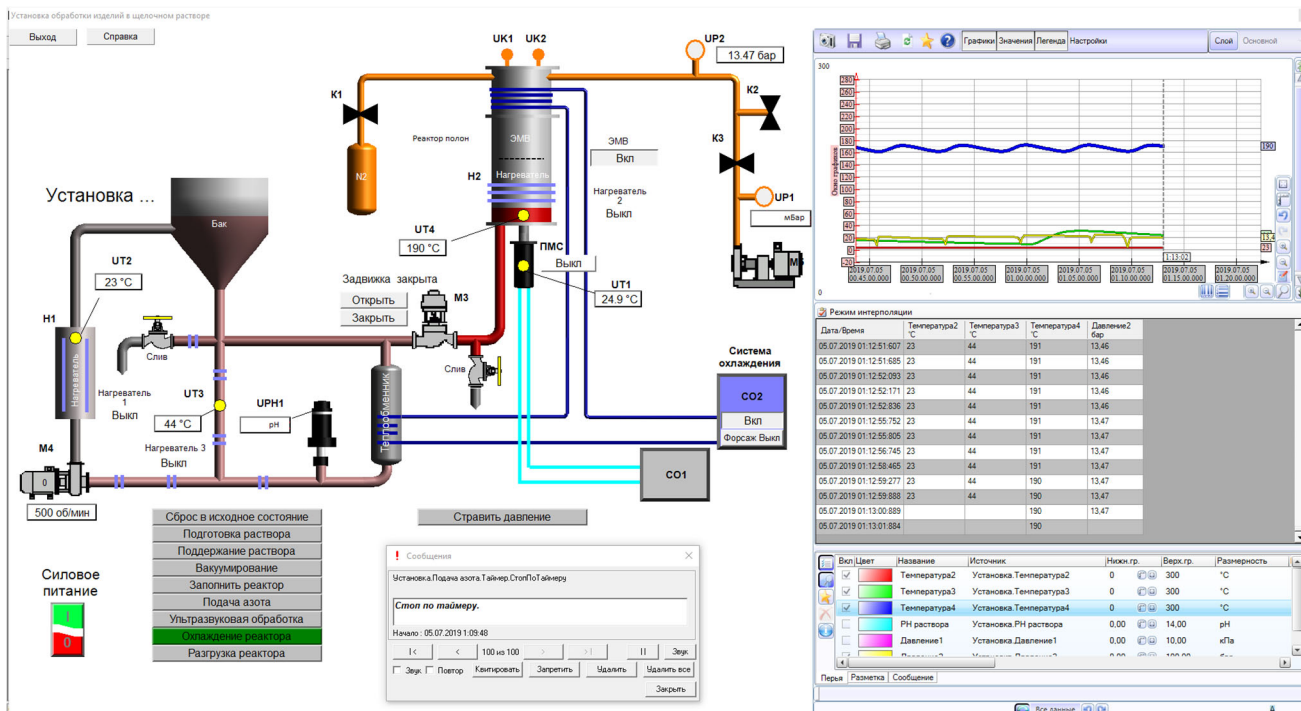


Рис. 7. Вид экрана управляющей технологическим процессом программы (мнемосхема).

## 5. Проведение промежуточных промывок лопаток.

Во время проведения технологического цикла извлекалась корзина с отливками для проведения промежуточных промывок внутренних полостей лопаток в установке для высоконапорной промывки (см. рис. 9) с помощью гидродинамической машины Посейдон АДВ ВНА 500-17 с возможностью подогрева воды (см. рис. 8).



Рис. 8. Гидродинамическая машина Посейдон АДВ ВНА 500-17



Рис. 9. Установка для высоконапорной промывки

Промежуточные промывки осуществлялись с целью удаления продуктов реакции керамического материала с щелочным раствором (шламообразной массы). Промывки лопаток производились в составе модульной корзины, закрепляемой в специальной оснастке (см. рис. 10) в установке для высоконапорной промывки при давлении гидродинамической машины 100...300 бар, температуре воды – 22 °С, длительности промывки каждой лопатки ~30 с.

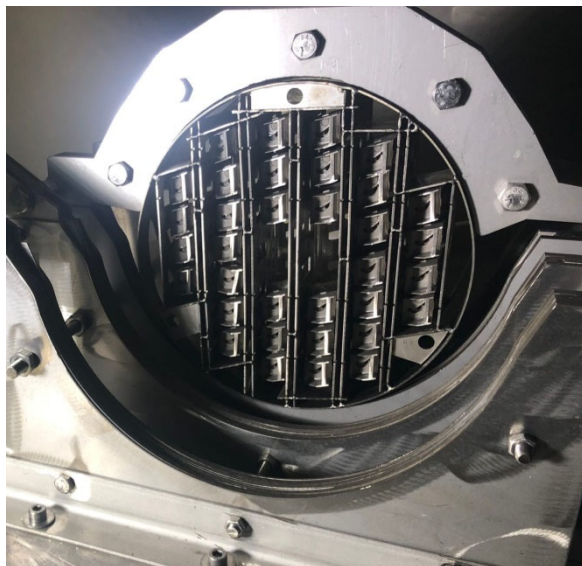


Рис. 10. Закрепление модуля с отливками для проведения промывки внутренней полости в гидродинамической машине.

С целью демонстрации наглядности процесса промывки через выходные каналы на рис. 11, 12 представлен процесс промывки лопаток в различных положениях с индивидуальным креплением каждой лопатки.



Рис. 11. Промывка лопаток АИ 222 через выходные каналы.



Рис. 12. Промывка лопатки ТВД через выходные каналы.

#### **6. Проведение окончательной промывки лопаток.**

После проведения последней части основного цикла очистки лопаток в рабочей камере в щелочной среде лопатки промывались в установке высоконапорной промывки с помощью гидродинамической машины по режимам промежуточных промывок (см. п. 5), затем осуществлялась окончательная промывка лопаток в барботируемых ваннах при температуре 90 °С в течение 30 мин (см. рис. 13).



Рис. 13. Окончательная промывка лопаток в составе модульной корзины в барботируемой ванне.

Сушка лопаток после окончательной промывки осуществлялась в сушильном шкафу ШС-80-02-СПУ с принудительной конвекцией воздуха при температуре 120 °С в течение 40 мин.

#### 7. Рентгеноконтроль на отсутствие остатков керамики.

Результаты рентгеноконтроля приведены в таблице 1.

#### 8. Исследование лопаток в металлографической лаборатории для определения максимальной глубины растрava на соответствие ТУ.

Согласно исследованию ЦЗЛ №460 от 09.07.2019 г. (см. прил. 2) на 2-х исследованных лопатках данной садки растрava по карбидам не обнаружено. Наблюдаются неровности поверхности глубиной до 20 мкм.

Максимально допустимая величина растрava по 99.37ТУ – до 40 мкм.

Таблица 1. Результаты проведения 1-го технологического цикла очистки лопаток ТВД.

«Лопатка рабочая ТВД» 99.04.02.325(790)			
№ п/п	Номер лопатки	Результат рентгеноконтроля	Глубина растрava
1.	Б9Д3635	годная	Растрava не обнаружено.
2.	Б9В2296	годная	
3.	Б9Д3758	годная	
4.	Б9Д3565	годная	
5.	Б9Д3618	годная	
6.	Б9В1373	годная	
7.	Б9Г3169	годная	
8.	Б9Г2458	годная	
9.	Б9В1551	годная	
10.	Б9Д3533	годная	
<b>Итого суммарный ВГ: 10 из 10 (100 %)</b>			

#### Технологический цикл №2 Лопатка рабочая ТНД 99.04.22.343(360)– 10 шт.

Соотношение вода (л): щелочь (кг)	10:24
Глубина вакуума	до 3,5 мБар
Рабочее давление	10...14 бар
Температура	180 °С
Суммарное время нахождения лопаток в щелочном растворе	5 ч 14 мин
Период колебаний давления	5 мин
Период колебаний корзины с отливками	1 мин



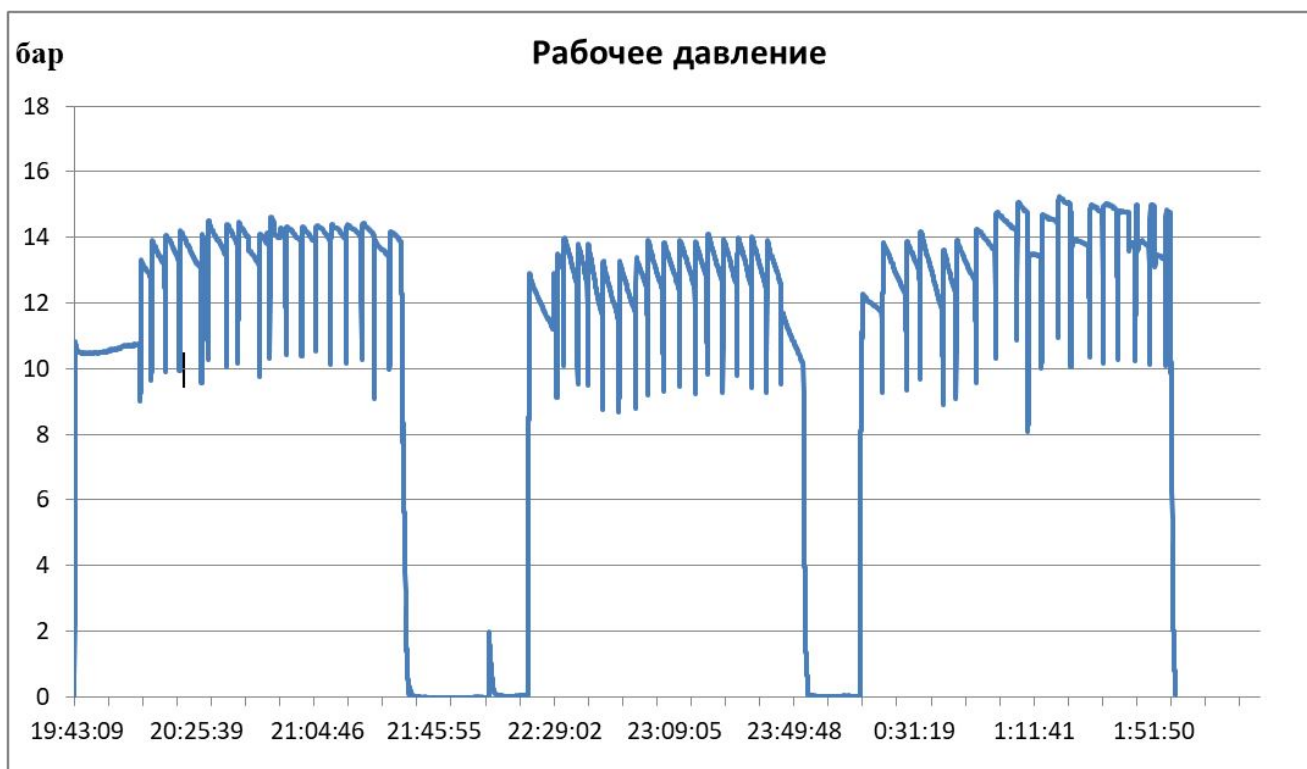


Рис. 14. График рабочего давления технологического цикла №2.

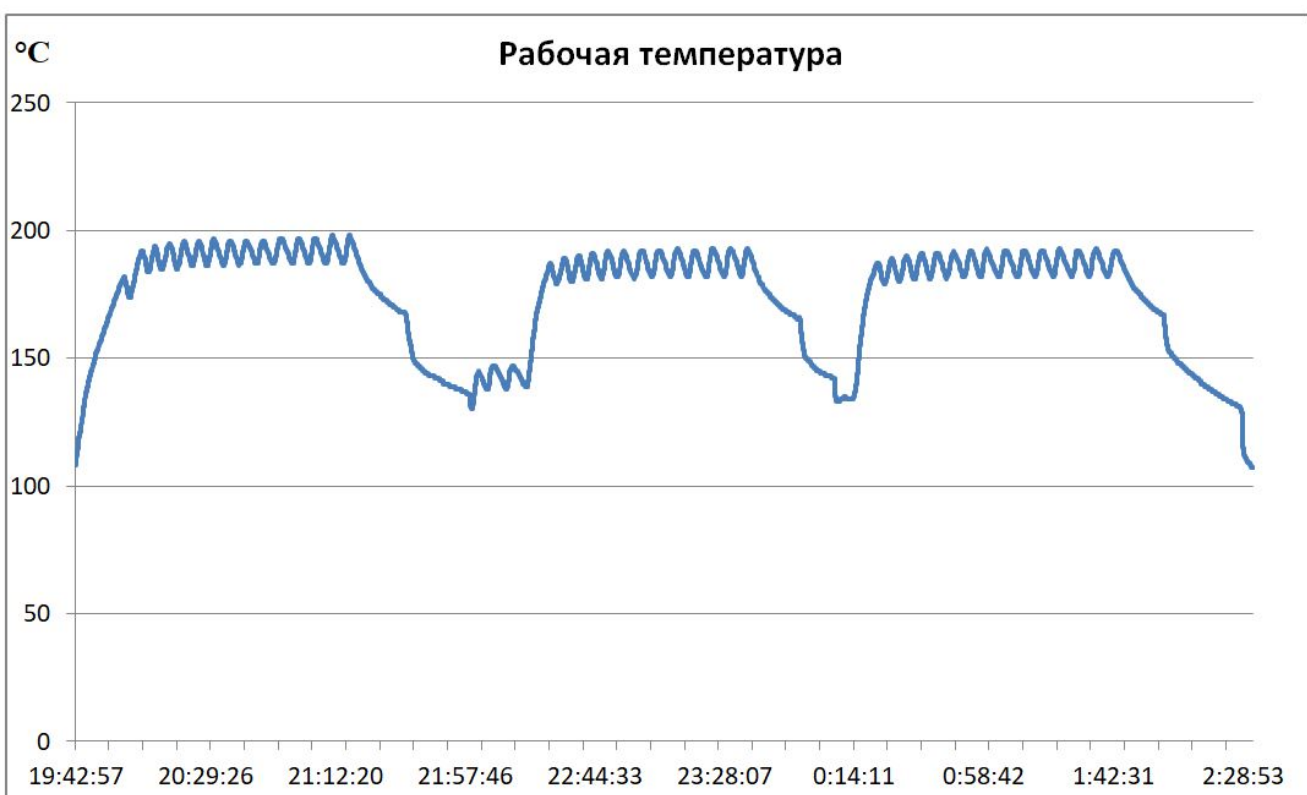


Рис. 15. График рабочей температуры технологического цикла №2.

Результаты рентгеноконтроля приведены в таблице 2.

Согласно исследованию ЦЗЛ №459 от 09.07.2019 г. (см. прил. 3) на 2-х исследованных лопатках данной садки растрava по карбидам не обнаружено. Наблюдаются неровности поверхности глубиной до 20 мкм.

Максимально допустимая величина растрava по 99.37ТУ – до 40 мкм.

Таблица 2. Результаты проведения 2-го технологического цикла очистки лопаток Лопатка рабочая ТНД.

«Лопатка рабочая ТНД» 99.04.22.343(360)			
№ п/п	Номер лопатки	Результат рентгеноконтроля	Глубина растрava
1.	Б9Г4634	годная	Растрava не обнаружено.
2.	Б9Г4633	годная	
3.	Б9Г4614	годная	
4.	Б9Г4734	годная	
5.	Б9В3756	годная	
6.	Б9Д5724	годная	
7.	Б9Г4620	годная	
8.	Б9В3798	годная	
9.	Б9Г4911	годная	
10.	Б9Г4405	годная	
<b>Итого суммарный ВГ: 10 из 10 (100 %)</b>			

**Технологический цикл №3** Лопатка рабочая ТВД 222.04.02.010(002) – 10 шт.

Соотношение вода (л): щелочь (кг)	10:24
Глубина вакуума	до 3,5 мБар
Рабочее давление	11...16 бар
Температура	250 °С
Суммарное время нахождения лопаток в щелочном растворе	9 ч. 30 мин.
Период колебаний давления	5 мин
Период колебаний корзины с отливками	1 мин

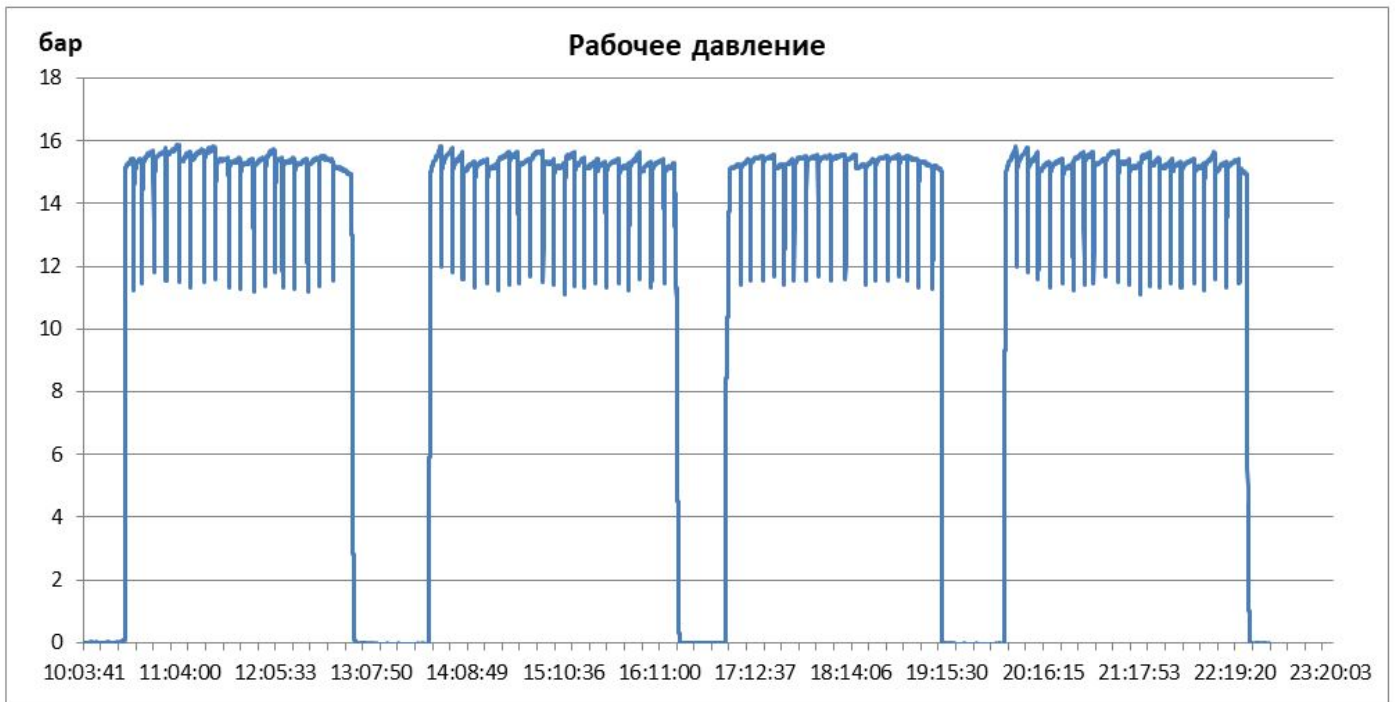


Рис. 16. График рабочего давления технологического цикла №3.

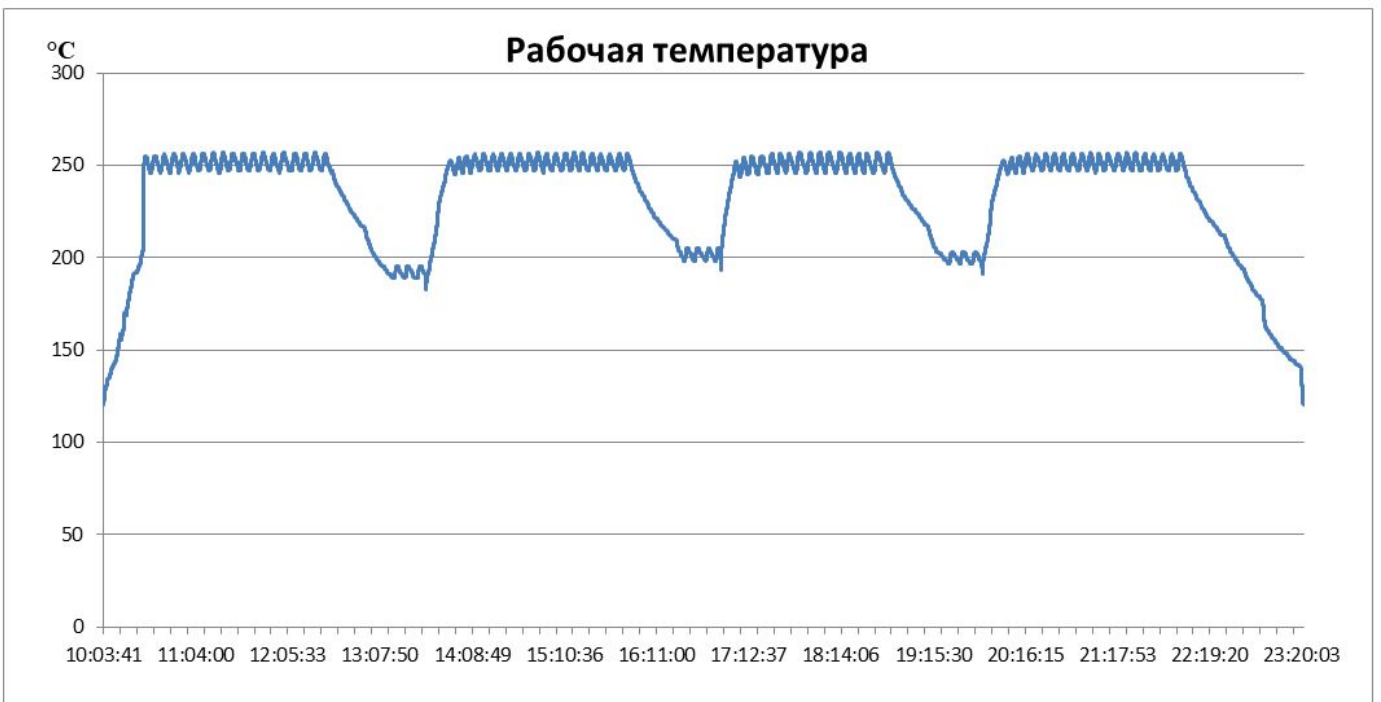


Рис. 17. График температуры технологического цикла №3.

Результаты рентгеноконтроля приведены в таблице 3.

Согласно исследованию ЦЗЛ №625 от 28.08.2019 г. (см. прил. 4) на лопатке данной садки (инд.№ Б9В1408) растрава по карбидам не обнаружено. Наблюдаются неровности поверхности глубиной до 6,28 мкм.

Максимально допустимая величина растрава по ТУ – до 20 мкм.

Таблица 4. Результаты проведения 3-го технологического цикла лопаток рабочих ТВД изд. АИ 222.

«Лопатка рабочая ТВД» 222.04.02.010(002)			
№ п/п	Номер лопатки	Результат рентгеноконтроля	Глубина растрава
1.	Б9Д1840	годная	Растрава не обнаружено.
2.	Б9Г1466	годная	
3.	Б5Г9906	годная	
4.	Б9В1408	годная	
5.	Б9В1253	годная	
6.	Б5Л1872	годная	
7.	Б8Н9332	годная	
8.	Б5Н2996	годная	
9.	Б5Н2988	годная	
10.	Б6Н374	годная	
<b>Итого суммарный ВГ: 10 из 10 (100 %)</b>			

**Технологический цикл №4 Лопатка рабочая ТВД 222.04.02.020(003) – 10 шт.**

Соотношение вода (л): щелочь (кг)	10:24
Глубина вакуума	до 3,5 мБар
Рабочее давление	13...15 бар
Температура	260 °С
Суммарное время нахождения лопаток в щелочном растворе	8 ч. 30 мин.
Период колебаний корзины с отливками	1 мин



Рис. 18. График рабочего давления технологического цикла №4.

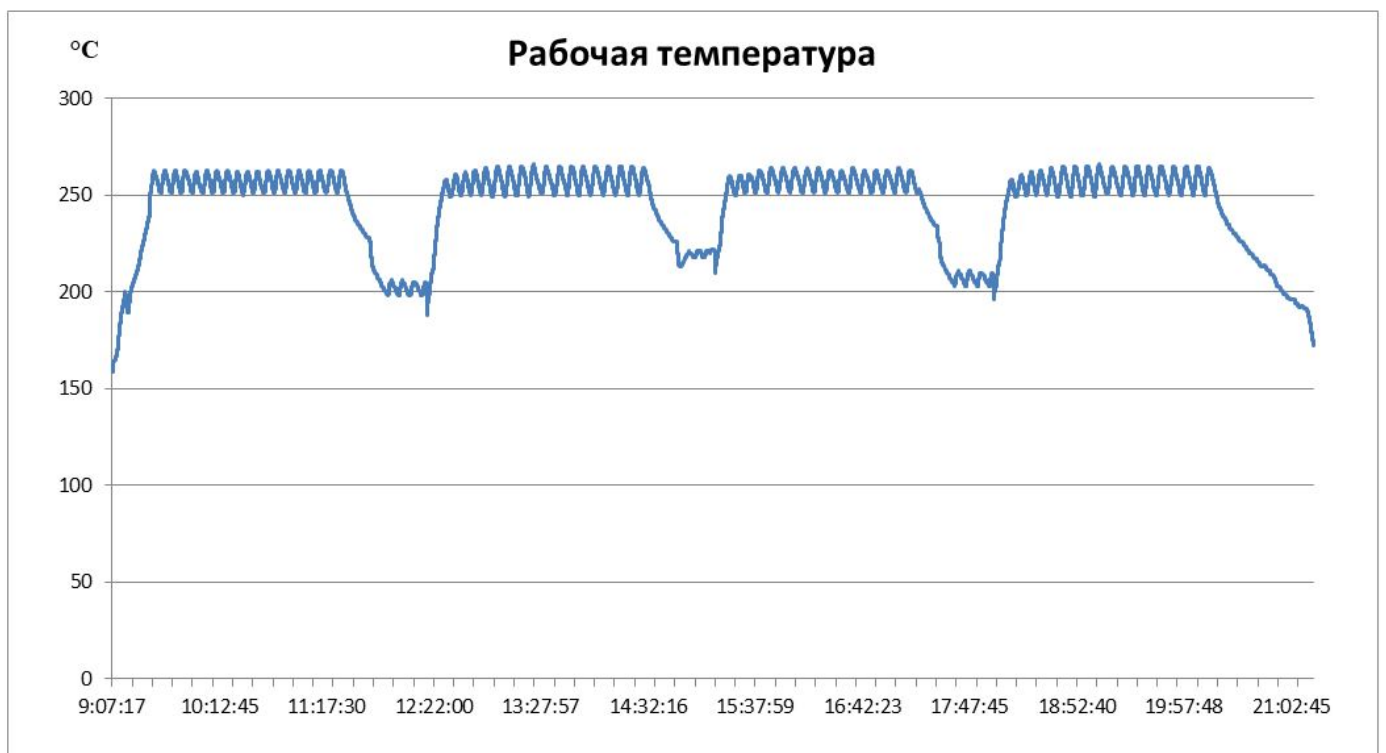


Рис. 19. График рабочей температуры технологического цикла №4.

Результаты рентгеноконтроля приведены в таблице 4.

Согласно исследованию ЦЗЛ №625 от 28.08.2019 г. (см. прил. 4) на лопатке данной садки (инд. №Б8А5195) растрava по карбидам не обнаружено. Наблюдаются неровности поверхности глубиной до 5,02 мкм.

Максимально допустимая величина растрava по ТУ – до 20 мкм.

Таблица 4. Результаты проведения 4-го технологического цикла лопатокрабочих ТВД изд. АИ 222 (правая)

«Лопатка рабочая ТВД» 222.04.02.020(003)			
№ п/п	Номер лопатки	Результат рентгеноконтроля	Глубина растрava
1.	Б8Д7011	годная	Растрava не обнаружено.
2.	Б4Д5836	годная	
3.	Б5Д421	годная	
4.	Б8Е7881	годная	
5.	Б8Е7884	годная	
6.	Б7М3019	годная	
7.	Б7М3022	годная	
8.	Б7П4356	годная	
9.	Б6Б5186	годная	
10.	Б8А5195	годная	
<b>Итого суммарный ВГ: 10 из 10 (100 %)</b>			

**Технологический цикл №5** Лопатка рабочая ТВД 99.04.02.239(970)– 10 шт.

Соотношение вода (л): щелочь (кг)	10:33
Глубина вакуума	до 3,5 мБар
Рабочее давление	14,5 бар
Температура	280 °С
Суммарное время нахождения лопаток в щелочном растворе	10 ч.
Период колебаний корзины с отливками	1 мин

В технологическом цикле №5 промежуточные промывки в высоконапорной установке с помощью гидродинамической машины осуществлялись пароводяной смесью с включением модуля нагрева воды и увеличением температуры до 110 °С.

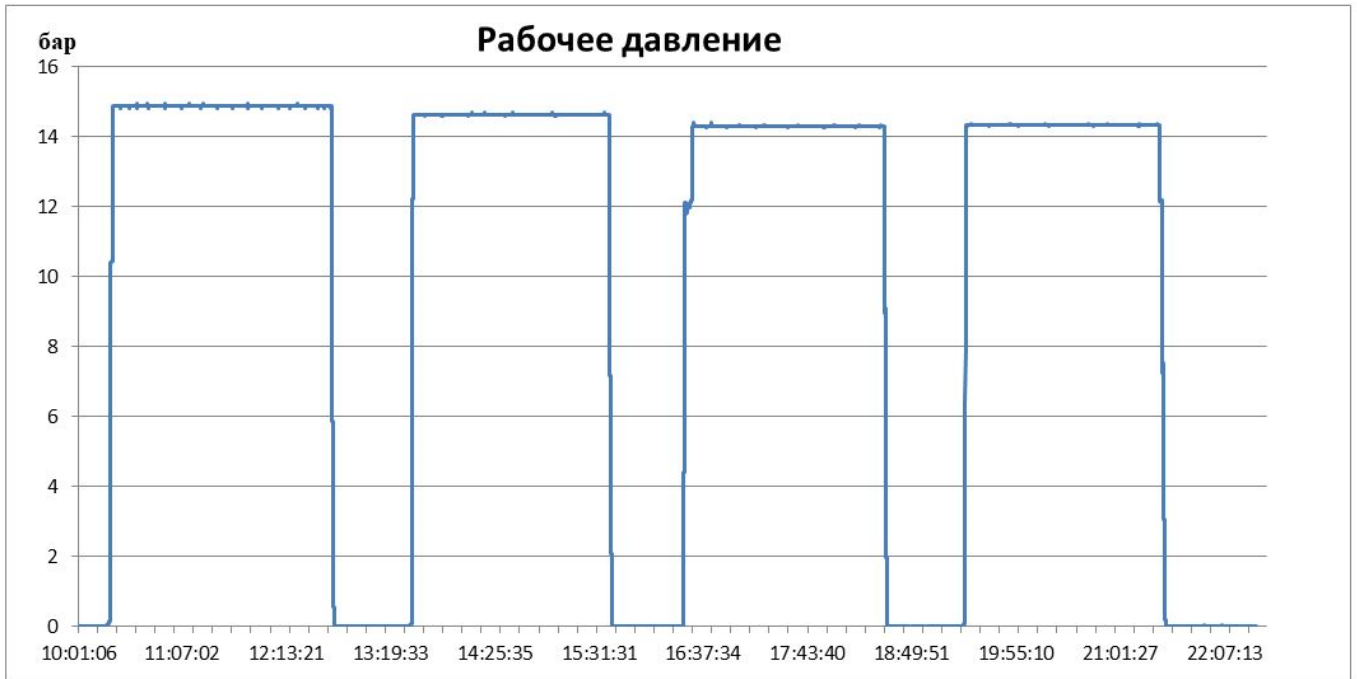


Рис. 120. График рабочего давления технологического цикла №5.

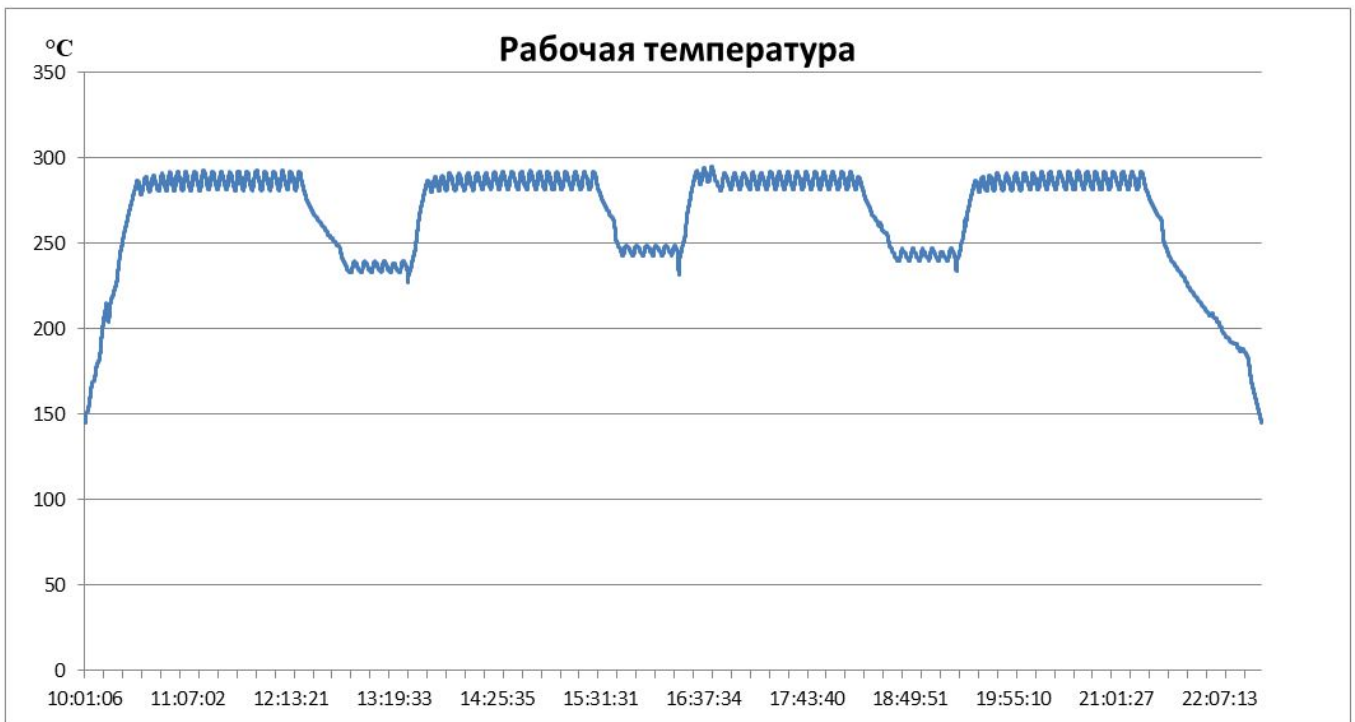


Рис. 21. График рабочей температуры технологического цикла №5.

Результаты рентгеноконтроля приведены в таблице 5.

Согласно исследованию ЦЗЛ №625 от 28.08.2019 г. (см. прил. 4) на лопатке данной садки (инд. №Б9А1278) растрava по карбидам не обнаружено. Наблюдаются неровности поверхности глубиной до 2,7 мкм.

Максимально допустимая величина растрava по ТУ – до 40 мкм.

Следует полагать, что полученные значения исходных шероховатостей определяются зернистостью материала керамических стержней.

Таблица 5. Результаты проведения 5-го технологического цикла лопаток рабочих ТВД (сплав ЖС-32).

99.04.02.239(970) «Лопатка рабочая ТВД»			
№ п/п	Номер лопатки	Результат рентгеноконтроля	Глубина растрava
1.	Б9А1284	годная	Растрava не обнаружено.
2.	Б9А1132	годная	
3.	Б9А1261	годная	
4.	Б9А1208	годная	
5.	Б9А1278	годная	
6.	Б9А1282	годная	
7.	Б8М841	годная	
8.	Б8М815	годная	
9.	Б8П995	годная	
10.	Б8П1072	кер.	
<b>Итого суммарный ВГ: 9 из 10 (90 %)</b>			

## 9. Выводы.

1. Проведены 5 технологических циклов очистки основных видов лопаток с различными составами керамических стержней из сплавов ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС32-ВИ. Определены различные режимы удаления керамических стержней для каждого вида отливок лопаток ГТД основной номенклатуры. Выход годного по результатам проведения 5 технологических циклов представлен в таблице 6.

Таблица 6. Выход годного при проведении одного цикла удаления стержней.

№ цикла	Наименование лопаток	Выход годного
1.	99.04.02.325(790)	100 % (10 из 10 шт.)
2.	99.04.22.343(360)	100 % (10 из 10 шт.)
3.	222.04.02.010(002)	100 % (10 из 10 шт.)
4.	222.04.02.020(003)	100 % (10 из 10 шт.)
5.	99.04.02.239(970)	90 % (9 из 10 шт.)

2. Согласно свидетельствам ЦЗЛ №459 от 09.07.2019 г.; 460 от 09.07.2019 г. и 625 от 28.08.2019 г. (см. прил. 2,3,4) растрava по карбидам во внутренних полостях исследуемых лопаток не обнаружено. Во внутренней полости лопаток керамический стержень удален полностью.



3. Новые технические решения, которые были заложены при проектировании и изготовлении оборудования, затем опробованы при испытаниях, а именно:

- предварительное вакуумирование,
- проведение промежуточных промывок на гидродинамической установке,
- ультразвуковое воздействие,
- создание системы колебаний корзины с отливками

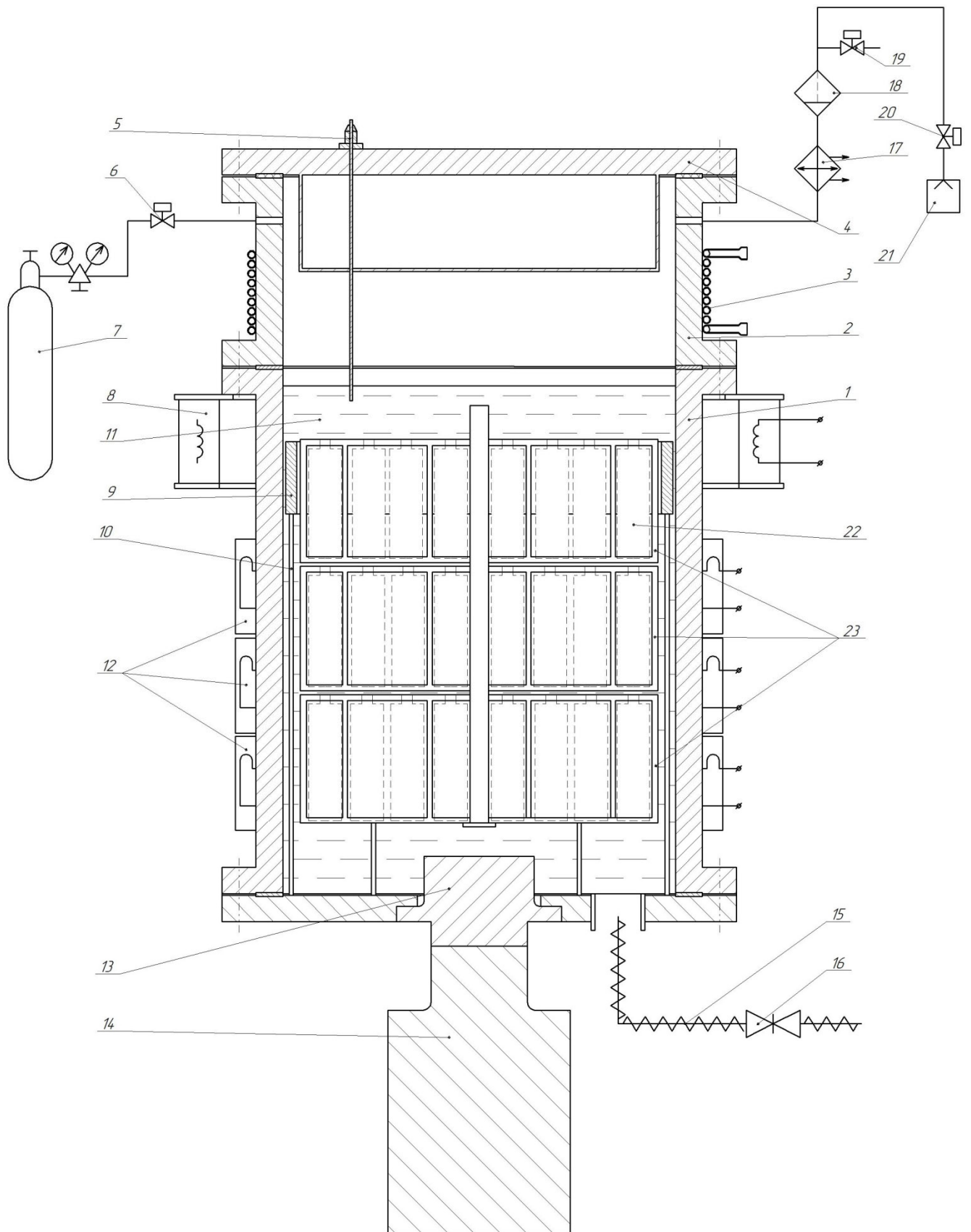
позволили значительно повысить эффективность процесса удаления керамических стержней из внутренних полостей отливок турбинных лопаток, снизить себестоимость и повысить безопасность (за счет снижения концентрации щелочного раствора и давления инертного газа, уменьшения времени проведения цикла), повысить качество проведения операции (растравливание внутренней поверхности отсутствует).

4. Относительно аналогичных серийных технологий рабочее давление было снижено в 15 раз (14,5 бар против 220 бар), рабочая температура снижена на 170...270 °С (180...280 °С против 450 °С), время проведения операции уменьшено до 1,5 раз (6 часов против 9 часов), приготовление и подача щелочного раствора производилась автоматически, а не вручную, как в аналогах. Верхняя граница давления было снижена, в том числе, за счет снижения нижней границы давления, реализованного в виде проведения предварительного вакуумирования камеры с отливками в начале операции. Меньший объем автоклавных камер способствует уменьшению инерционности процесса и увеличению скорости нагрева и охлаждения автоклавной камеры с щелочным раствором, что позволяет сократить общее время очистки, а также становится возможным извлечение корзины с отливками в течение цикла. В серийных технологиях удаление керамики в щелочной среде происходит за счет чрезмерно высоких (закритических) значений давления и температуры и создания амплитуды давлений, в то время как при проведении вышеописанных испытаний удалось снизить параметры за счет внедрения новых решений, которые являются более эффективными и безопасными.

5. При удалении керамических стержней из лопаток сплава ЖС6У-ВИ (р. л. ТВД №99.04.02.325(790), р. л. ТНД №99.04.22.343(360)) удалось существенно сократить общее время проведения технологического цикла и снизить значения основных параметров процесса (давление и температура), при удалении стержней из лопаток сплавов ЖС26-ВИ (р. л. АИ222.04.02.010(002)/020(003)) и ЖС32-ВИ (р. л. ТВД 99.04.02.239(970)) удалось существенно снизить значения основных параметров процесса относительно аналогичных способов удаления стержней в щелочных растворах.

6. В соответствии с тем, что удаление керамических стержней из отливок пустотелых турбинных лопаток из никелевых жаропрочных сплавов по вышеописанной технологии позволяет провести операцию очистки без растрова (полное отсутствие повреждения внутренних поверхностей охлаждаемых каналов) и обеспечивает полное удаление керамики, технология ООО «РусТурбоТехнологии» может быть рекомендована к производственному внедрению в условиях ПК «Салют» АО «ОДК».

**Приложение 1.** Силовой блок комплекса оборудования для удаления керамических стержней.



Дата: 09.07.19 г.  
БТК ц. №38 - 1 экз.  
БЛП УГМет - 1 экз.  
Мет. лаб. - 1 экз.

**ИССЛЕДОВАНИЕ №460**

**2-х лопаток рабочих ТВД - дет. №99.04.02.325 из сплава ЖС6У-ВИ**

В металлографическую лабораторию по служебной записке БТК цеха №38 поступили 2 лопатки рабочие ТВД – дет. №99.04.02.325 из сплава ЖС6У-ВИ инд. Б9Д3635, инд. Б9В1551 для определения глубины растрыва после удаления керамического стержня из внутренней полости методом выщелачивания на установке РТТ (опытные работы) в течении 5 часов.

**Результаты исследования**

Исследованием микрошлифов, изготовленных в поперечном сечении пера лопаток, установлено:

- керамический стержень удален полностью (фото 1);
- во внутренней полости пера лопаток растрыва по карбидам не обнаружено, наблюдаются неровности поверхности глубиной до 20 мкм (фото 2).

По ТТ чертежа: максимальная величина растрыва до 40 мкм.

Фотографии характерного вида поверхности и микроструктура материала лопаток во внутренней полости приведены на отдельном листе.

Начальник ЦЗЛ

*А.М. Терехин*  
09.07.19

Терехин А.М.

Начальник мет. лаб.

*М.Н. Каменева*  
09.07.19

Каменева М. Н.

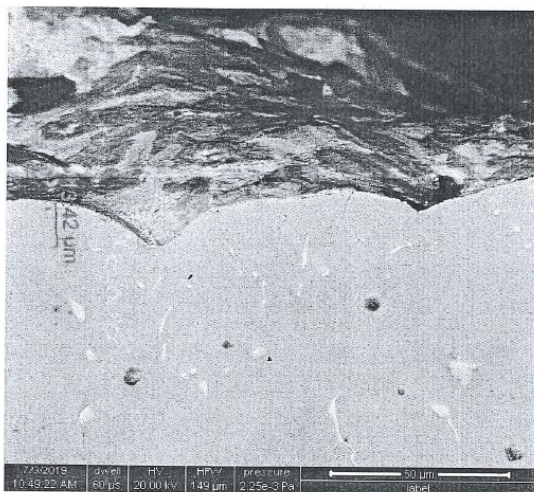
Инженер

*О.А. Михеева*  
09.07.19

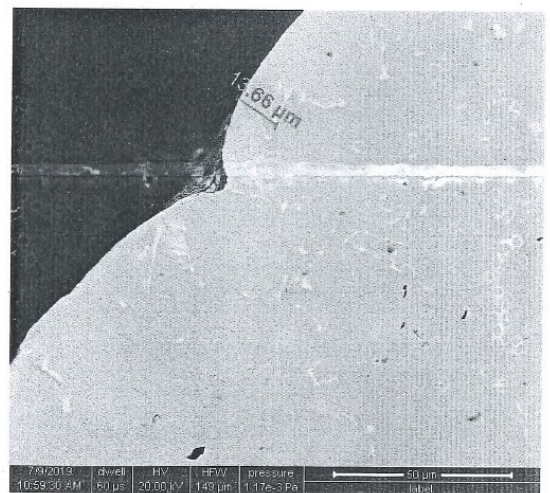
Михеева О.А.



Фото 1. Характерный вид поверхности во внутренней полости лопаток на электронном микроскопе в режиме «сomp»



а) инд.Б9Д3635



б) инд.Б9В1551

Фото 2. Микроструктура материала лопатки во внутренней полости на электронном микроскопе в режиме «сomp»

**Приложение 3. Исследование ЦЗЛ на растрав лопаток 99.04.22.343(360).**

Дата: 09.07.19 г.  
БТК ц. №38 - 1 экз.  
Мет. лаб. - 1 экз.

**ИССЛЕДОВАНИЕ №459**

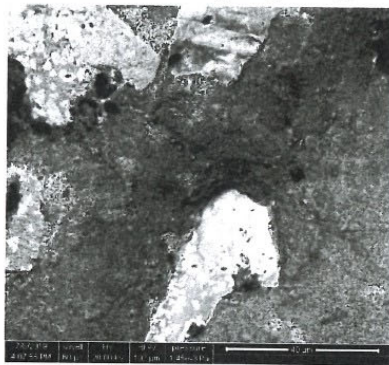
**2-х лопаток рабочих ТНД - дет. №990422343 из сплава ЖС6У-ВИ**

В металлографическую лабораторию по служебной записке БТК цеха №38 поступили 2 лопатки рабочие ТНД – дет. №990422343 из сплава ЖС6У-ВИ инд. №Б9В3798, инд. №Б9Г4620 для определения глубины растрав после удаления керамического стержня из внутренней полости методом выщелачивания на установке РТТ (опытные работы), в течении 5 часов.

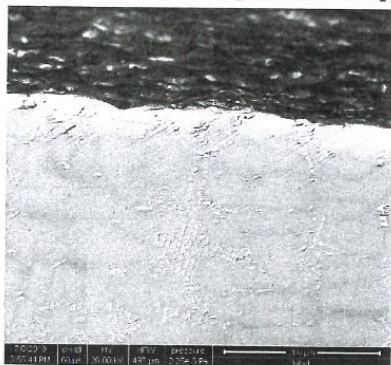
Исследованием микрошлифов, изготовленных в поперечном сечении центральной части пера лопаток, установлено (фото 1):

- керамический стержень удален полностью;
- растрав по карбидам во внутренней полости обеих лопаток не наблюдается, отмечается наличие неровностей поверхности величиной до 20мкм (фото 1).

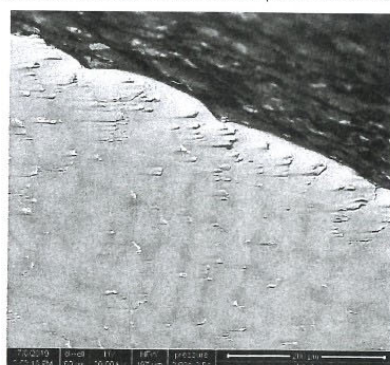
По ТТ чертежа: максимальная величина растрав до 40мкм.



характерный вид внутренней поверхности лопаток после выщелачивания



инл. №Б9В3798



инл. №Б9Г4620

**Фото 1. Микроструктура материала лопаток во внутренней полости**

Начальник ЦЗЛ

Начальник мет. лаб.

Исполнитель

*Куш* 09.07.19  
*Каменева* 09.04.19.  
*Куш* 09.07.19.

Терехин А.М.

Каменева М. Н.

Кушнирук Н.Д.

Приложение 4 (на 2-х листах). Исследование ЦЗЛ на растрав лопаток 99.04.02.239(970), АИ222.04.02.010/020(002/003).

Дата: 28.08.19 г.  
БТК ц. №38 - 1 экз.  
БЛП УГМет - 1 экз.  
Мет. лаб. - 1 экз.

### ИССЛЕДОВАНИЕ №625

**3-х лопаток рабочих ТНД - дет. №990402239 из сплава ЖС32ВИ;  
2220402002/003 из сплава ЖС26-ВИ**

В металлографическую лабораторию по служебной записке БТК цеха №38 поступили 3 лопатки рабочие ТНД – дет. №99042239 из сплава ЖС32-ВИ инд. №Б9А1278, 2220402002/003 из сплава ЖС26-ВИ инд. №Б9В1408, Б8А5195 для определения глубины растрыва после удаления керамического стержня из внутренней полости методом выщелачивания на установке РТТ (опытные работы), в течении 10 часов.

Исследованием микрошлифов, изготовленных в поперечном сечении центральной части пера лопаток, установлено (фото 1):

- керамический стержень удален полностью;
- растрыва по карбидам во внутренней полости обеих лопаток не наблюдается, отмечается наличие неровностей поверхности величиной:
  - на лопатке №990402239 пл. Б9А1278 до 2,7 мкм;
  - на лопатке №2220402002 пл. Б9В1408 до 6,28 мкм;
  - на лопатке №2220402003 пл. Б8А5195 до 5,02 мкм.


По ТТ чертежа: на лопатке №990402239 максимальная величина растрыва до 40 мкм; на лопатке №2220402002/003 максимальная величина растрыва до 20 мкм.

и.о. Начальник ЦЗЛ

Начальник мет. лаб.

Исполнитель

 28.08.19.

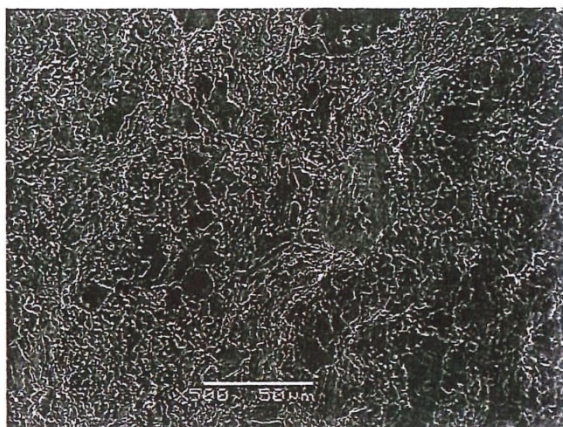
  
Терехин А.М.

 28.08.19.

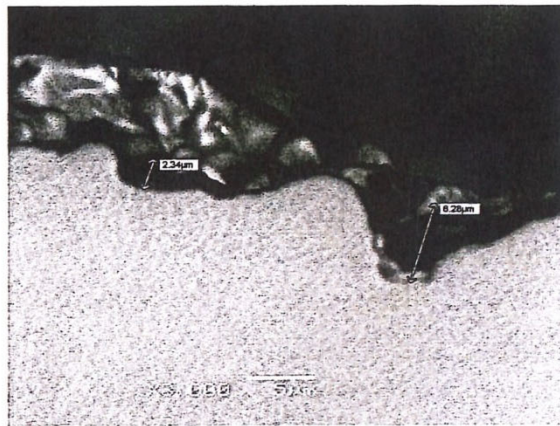
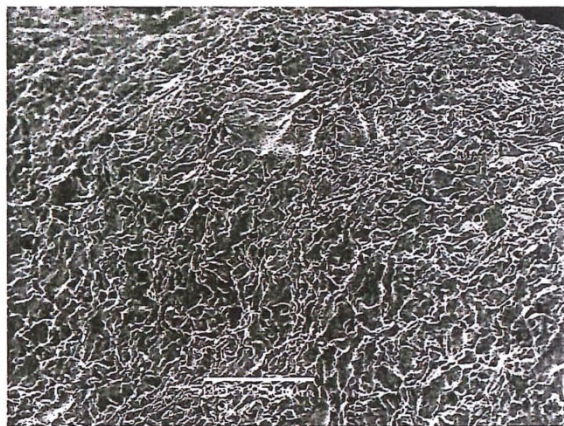
Каменева М. Н.

 28.08.19.

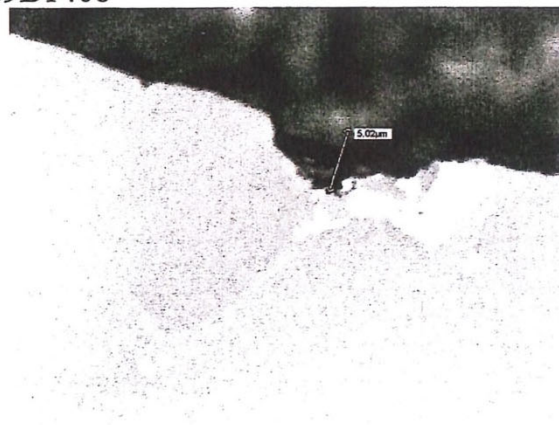
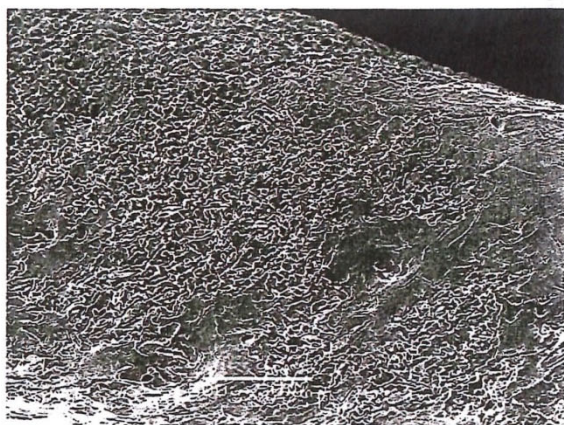
Лефарова Н.В.



инд. №Б9А1278



инд. №Б9В1408



инд. № Б8А5195

**Фото 1. Микроструктура материала лопаток во внутренней полости**