

На правах рукописи



Сокольников Василий Николаевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА БАЛАНСИРУЕМЫХ
РОТОРОВ ЛОКАЛЬНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКОЙ
МИКРОШАРИКАМИ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель

Сухочев Геннадий Алексеевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Бутенко Виктор Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», профессор ка-
федры «Технология машиностроения»

Кропоткина Елена Юрьевна,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет «Станкин», профессор кафедры
«Высокоэффективные технологии
и обработка»

Ведущая организация

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Волго-
градский государственный технический
университет», г. Волгоград

Защита состоится 17 ноября 2021 года в 14⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ), ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (БГТУ), по адресу: г. Воронеж, Московский проспект, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» www.cchegeu.ru.

Автореферат разослан «5» июля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. техн. наук, профессор



Кириллов Олег Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Высокие статические и динамические нагрузки на высоких оборотах авиационно-космической техники влияют, прежде всего, на ресурс работы колес турбин и крыльчаток, как наиболее нестационарно нагружаемых составляющих ротора. Сложная силовая схема знакопеременных нагрузок, воздействующих на поверхность лопаточной детали ротора, способствуют тому, что некоторые элементы конструкции работают в области упругопластических деформаций. Требуемая долговечность лопаточных деталей при обеспечении циклической усталостной прочности при высоком уровне напряженности элементов конструкции достигается устранением остаточного дисбаланса, наследованного от предыдущих этапов изготовления ротора.

Традиционные методы балансировки быстроходных роторов предусматривают в основном снятие излишков металла в местах повышенного дисбаланса. Так как все лопаточные детали таких роторов подвергают в процессе изготовления отделочно-упрочняющей обработке, повышающей качество рабочих поверхностей, то снятие металла при балансировке в локальных зонах приводит к снижению твердости на предварительно упрочненных поверхностях и неуправляемому перераспределению остаточных напряжений в поверхностном слое материала и изменению их направления. Следы механической обработки на поверхности становятся нежелательными концентраторами растягивающих напряжений, особенно в местах наибольшего снятия металла в зонах, прилегающих к галтелям у «корня» лопатки.

Негативное влияние на качество поверхностного слоя и усталостную прочность лопаточной детали оказывают механическая зачистка фрезами и обработка абразивом по принципу получения минимальной шероховатости в этих местах. Неорганизованное ручное снятие излишков материала образует в тонких приповерхностных слоях структурную неоднородность, приводит к шаржированию, образованию остаточных напряжений растяжения и появлению поверхностных и приповерхностных микротрещин, изначально слабо проявляющихся. По мере наступления усталости материала при малоцикловых нагружениях в водородосодержащих средах они сливаются в макродефекты в местах наибольшей концентрации при видимом отсутствии разрушений на поверхности. Широко известные отечественные научные школы (МГТУ-МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, ВГТУ г. Воронеж и др.) отдают предпочтение традиционному регламенту. При котором места снятия металла формально удалены от расчетных мест максимальной концентрации напряжений, а разрушения объясняются различными причинами производственного и эксплуатационного характера. Однако для перспективных изделий эта концепция **по степени разработанности** не обеспечивает требуемых параметров качества, так как не гарантирует достаточный ресурс работы при частоте вращения ротора от 1000 с^{-1} и более. Остались неизученными **актуальные** вопросы теоретического описания процессов качества формирования заданного физико-механического состояния поверхности при предварительной отделочно-упрочняющей обработке и научно-методического обоснования ее последующего эксплуатационного поведения после локального нарушения наклепанного слоя в процессе устранения дисбаланса. Разрешить этот **научно-технический** вопрос предполагается разра-

боткой методики технологического сохранения работоспособного состояния поверхностей деталей ротора на всех этапах его доводки, включая динамическую высокочастотную балансировку, метод локального выравнивания физико-механического состояния поверхностей лопаточных деталей после балансировочной зачистки, и введением этой операции в комплексный технологический процесс доводки ротора динамической балансировкой.

В связи с этим решение задачи создания теоретических и методических способов комбинированной обработки локальных участков дестабилизированной поверхности с одновременным упрочнением электро-химико-механической комбинированной обработкой позволит заполнить существующий пробел в научно обоснованных методах и средствах технологического обеспечения качества балансируемого высокооборотного ротора с обеспечением и сохранением заданного ресурса его лопаточных деталей. Работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и научным направлением ВГТУ согласно плану ГБ НИР № 2018.15 «Разработка, исследование и практическое использование нетрадиционных методов и средств проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности аэрокосмической техники нового поколения».

Целью работы является разработка теоретических основ и технологии локального упрочнения поверхности сложного профиля лопаточных деталей ротора в местах повышенной дестабилизации ее физико-механического состояния снятием металла по результатам балансировки за счет комбинированной электро-химико-механической обработки микрошариками в токопроводящей среде, технологически обеспечивая выравнивание характеристик всего поверхностного слоя за счет управления технологическими параметрами комбинированных воздействий. **Определены задачи:**

1. Разработать теоретические основы технологического обеспечения и принципы адаптации режимов процесса комбинированной обработки микрошариками различных фракций участков поверхностей лопаточных деталей ротора со-размерно локальной деструкции металла после балансировки.

2. Обосновать физическую и математическую модель технологической схемы «микрошарики – токопроводящая среда – локальный участок поверхности – переходная зона» при комбинированной электро-химико-механической обработке локальных участков поверхности с нестабильными физико-механическими свойствами.

3. Установить закономерности влияния электромеханических параметров формообразования и гранулометрического состава обрабатывающей среды на получение заданной величины наклепа и граничные условия реализации комбинированного процесса выравнивания физико-механического состояния поверхности ротора, нарушенной при устранении дисбаланса.

4. На основе экспериментальных исследований определить закономерности влияния параметров комбинированных воздействий в процессах комбинированной обработки поверхности сложного профиля на качество балансируемых роторов и создать структуру технологического обеспечения заданных показателей поверхности, осуществляемую режимными параметрами процесса упрочнения.

5. Предложить методику проектирования технологии комбинированной обработки, обеспечивающую качество поверхности за счет выравнивания физико-механических свойств участков зачистки и остальной поверхности с учётом особенностей балансировки ротора и эксплуатационных нагрузок.

6. Разработать новый патентоспособный технологический процесс локальной комбинированной отделочно-упрочняющей обработки в процессе доводки ротора динамической балансировкой до требуемого качества и заданного ресурса.

Решение этих задач необходимо для разработки теоретических и методических основ локального упрочнения участков поверхности детали, дестабилизированных при устранении дисбаланса ротора. Это позволит заполнить существующий пробел в научно обоснованных методах и средствах технологического обеспечения оптимальных условий эффективной доводки высокооборотного ротора с обеспечением и сохранением заданного ресурса его работы.

Объекты исследования: технологические процессы доводки высокооборотных роторов с локальным отделочно-упрочняющим воздействием на лопаточные детали после балансировки с учетом ресурса работы в экстремальных условиях эксплуатации (не менее 10^7 циклов нагружений при частоте 1000 с^{-1}).

Методы исследования. Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теорий физико-технической обработки, технической механики, явления анодного растворения металла, методов математического моделирования и современных графических и вычислительных средств. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных контрольно-измерительных средств, с применением стандартных методик планирования эксперимента и методик оценки режимных параметров процесса, разработанных автором.

Предметом исследования явились закономерности изменения параметров в технологической системе комбинированных обрабатывающих воздействий на поверхность при управлении режимными параметрами процессов на всех этапах доводки ротора, связанных с устранением дисбаланса, методы расчета параметров, прогнозирование достижимого качества балансируемых роторов и технологические рекомендации по обеспечению качества.

Достоверность результатов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованным использованием аналитических зависимостей, строгостью использованного математического аппарата, корректной постановкой экспериментов, обработкой экспериментальных данных и подтверждается качественным и количественным соответствием теоретических исследований с экспериментальными данными.

Научная новизна работы заключается в разработке теоретических основ и новой технологии выравнивания физико-механических свойств и качества участков поверхности детали роторной группы, дестабилизированных в процессе устранения дисбаланса за счет комбинированного применения анодного растворения металла в процессе обработки микрошариками. Новые научные результаты состоят в том, что:

1. Установлены технологически достижимые условия для сохранения в процессе доводки высокооборотных (1000 с^{-1}) роторов стабильных физико-механических свойств нагруженных поверхностей (степени наклепа от 2 до 4%) и шероховатости R_a не выше 1,6 мкм, достигнутых на предыдущих операциях обработки деталей ротора и локально снятых после балансировки с использованием механической зачистки.

2. Исходя из энергетических составляющих локального комбинированного процесса, при скорости, достигаемой микрошариком в газожидкостной среде, не менее 20 м/с, возможно выровнять заданные физико-механические свойства, требуемую шероховатость и степень наклепа (разброс значений от 2,5 до 4,0%) на критически напряженных участках локальной нарушенной поверхности путем воздействия мирошариков в среде анодного растворения металла.

3. Эта локальная упрочняющая обработка позволяет расширить возможности создателей новой техники по работоспособности и надежности высокооборотного ротора в экстремальных условиях его эксплуатации при частоте вращения ротора не менее 1000 с^{-1} при работе до разрушения более 10^7 циклов.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана методика проектирования технологии локальной комбинированной обработки в процессе доводки ротора, обеспечивающая выравнивание физико-механических свойств на основе оптимизации комбинированных воздействий используемых процессов, с учётом конструктивных особенностей и эксплуатационных термодинамических нагрузок в интервале температур от 20 К до 4000 К, рабочей частоты вращения 1000 с^{-1} и знакопеременных нагружениях в водородосодержащих средах.

2. Создана методика и технологическое обеспечение заданных показателей поверхности на локальных участках и переходных зонах с нестабильным состоянием свойств, достигаемые комбинированными воздействиями на отдельных этапах сквозного технологического процесса доводки высокооборотного ротора, до требуемого качества и заданного ресурса эксплуатации.

3. Разработан патентоспособный технологический процесс локальной отделки и упрочнения лопаточных деталей микрошариками в токопроводящей среде при доводке ротора в процессе балансировки.

Личный вклад соискателя. Положения, **выносимые соискателем на защиту**, созданы при его непосредственном участии:

- разработанные теоретические основы интенсификации комбинированных электро-химико-механических процессов при формировании требуемого физико-механического состояния поверхности за счет управления технологическими режимами струйно-динамических потоков микрошариков;

- компоновочные решения по настроечным имитаторам и сложносоставным эжекторным соплам для стабильной подачи составов рабочих сред, которые позволили технологически обеспечить процесс комбинированного формообразования локальных участков поверхности для обеспечения заданного ресурса работы лопаточной детали ротора;

- технологические параметры формирования физико-механических свойств комбинированными воздействиями, которые позволили технологически обеспечить процесс локальной комбинированной обработки участков съема металла при доводке ротора, назначить технологические мероприятия по обеспечению заданной долговечности лопаточной детали;
- участие во внедрении созданного метода и средств технологического оснащения с получением экономического эффекта;
- обоснование использования спроектированных режимов и технологического процесса для повышения ресурса работы изделий машиностроения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту специальности 05.02.08 – Технология машиностроения по пунктам: 2 – Технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие ходы, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости; 3 – Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения; 7 – Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.

Реализация работы. Результаты работы в 2017-2018 гг. переданы в АО КБХА и ОАО «НИИЛМ» (г. Воронеж), апробированы и внедрены в производственных условиях с общим годовым эффектом 770 тысяч рублей. Основные научные положения работы используются в учебном процессе и при выполнении ГБ НИР на кафедре ТМ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференциях, семинарах, в том числе: на 8-ой Международной научно-технической конференции «Научоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (ТМ-2016), (Москва, МАДИ, 2016); Международной научно-технической конференции, посвящённой 60-летию Липецкого государственного технического университета (Липецк, 2016); XXI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 90-летию со дня запуска первого искусственного спутника земли (Королев, РКК «Энергия», 2017), X Международной научно-технической конференции «Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике» (ТМ-18), (Воронеж, ВГТУ, 2018); XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2019 г.), X Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (ИнМаш-2019), (Кемерово, Шерегеш, 2020); научных семинарах кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (2015-2020 гг.).

Публикации. Автором по теме диссертации опубликовано 18 научных работ общим объемом 7,8 п.л., из которых лично соискателю принадлежит 5,3 п.л. В это число входит одна публикация в международной базе Scopus, 6 публикаций в изданиях из перечня ВАК и два патента.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов, списка используемых источников из 128

наименований, содержит 42 рисунка, 6 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показана научная и практическая значимость работы.

Первая глава содержит результаты анализа известных процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаточных деталей и доводки роторов с учетом всего технологического процесса изготовления и характера эксплуатации типовых изделий. Анализ представленной информации позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее перспективными для локального упрочнения и повышения ресурса поверхности сложного профиля в настоящее время являются комбинированные методы, включающие в себя такие виды воздействий на поверхность металла: механическое непрофилированным инструментом и анодное растворение в точках контакта обрабатывающей среды с поверхностью;

- существующие математические модели и технологические схемы повышения качества локальных участков поверхности сложного профиля с использованием различных видов физических воздействий не учитывают влияния технологически наследованного состояния поверхностей, дестабилизированных неорганизованным воздействием, ограничиваясь процессами формирования заданной шероховатости с исходного «нулевого» состояния поверхности, нормированного конструкторской документацией, без чего невозможно направленное выравнивание требуемого состояния поверхностного слоя материала с учетом условий эксплуатации;

- в настоящее время отсутствуют эффективные технологические методы комбинированной локальной обработки поверхностей деталей сложного профиля, особенно если существуют значительные различия в состоянии локального участка и в переходной зоне от участка зачистки к остальной поверхности;

- известные материалы по механизму влияния различных физико-механических воздействий на протекающие в зоне комбинированной обработки процессы не дают однозначного и обоснованного представления о методах управления технологическими режимами для достижения заданных технологических и эксплуатационных показателей.

В результате анализа имеющихся данных обоснована возможность технологического обеспечения локального упрочнения мест зачистки по результатам балансировки за счет выявления и учета влияния особенностей внешнего и внутреннего воздействий технологической наследственности на механизм формирования поверхностного слоя с требуемыми характеристиками, учитывая требования к качеству балансируемых деталей роторов.

Вторая глава посвящена разработке рабочих гипотез и программы выполнения теоретических и экспериментальных исследований. В работе выдвинуты и обоснованы следующие **предположения**:

1. Эжекция в потоке сжатого воздуха создает энергетическое воздействие, необходимое для формирования микрошариками равномерного наклепа поверхностного слоя по всей локальной зоне зачистки с обеспечением заданной стабильности технологических параметров процесса, не допуская перенаклепа.

2. Механическое воздействие на выступ микропрофиля одновременно с электрохимическим растворением окисной пленки происходит во время кратковременных импульсных контактов токопроводящих микрошариков фракцией 50...150 мкм с локальными участками дестабилизированного поверхностного слоя.

3. Поток смеси сжатого воздуха и токопроводящей жидкости в состоянии капельной фракции обеспечивает энергию соударения микрошариков с деталью на значениях, способных создавать равномерный наклеп заданной величины. Соответственно, механическое контактное взаимодействие в технологической операции локального упрочнения деталей ротора вносит основной вклад в формирование показателей качества упрочняемого поверхностного слоя.

4. Слабая токопроводность микрошариков и технической воды, разбрызгиваемой потоком сжатого воздуха до капель размером 0,4-0,6 мм, не препятствует эффективному электрохимическому безразмерному воздействию, направленному на растворение вершин выступов микрорельефа в местах зачистки металла и переходных зонах.

5. За счет изменения давления сжатого воздуха, гранулометрического состава микрошариков, подачи, проводимости и концентрации газожидкостной среды возможно восстанавливать физико-механические свойства материала на локальных участках в управляемом режиме с целью повышения качества балансируемых роторов.

Анализ объекта обработки показывает, что неорганизованное ручное снятие излишков материала (рис. 1) образует в тонких приповерхностных слоях структурную неоднородность, приводит к образованию остаточных напряжений растяжения, поверхностных и приповерхностных микротрещин, проявляющихся в водородосодержащих средах. По мере наступления усталости материала при малоцикловых нагружениях они сливаются в местах наибольшей концентрации накопившегося деформационного потенциала и выходят на сами лопатки (рис. 2).



Рис. 1. Зона снятия материала для устранения дисбаланса



Рис. 2. Трещина у «корня» лопатки

Для борьбы с этим явлением предложен способ комбинированной обработки нарушенных участков поверхностей деталей токопроводящими гранулами в виде микрошариков с наложением низковольтного напряжения с применением несущего потока сжатого воздуха и капельной фракции технической воды. Разработанный метод обеспечивает равномерный на-клеп, успешно выравнивает и перераспределяет шероховатость, наследованную от предыдущих операций упрочнения и балансировочной зачистки, с помощью электрохимического безразмерного воздействия снимает перенаклепанный дефектный слой материала с деформированных микрошариками выступов микронеровностей.

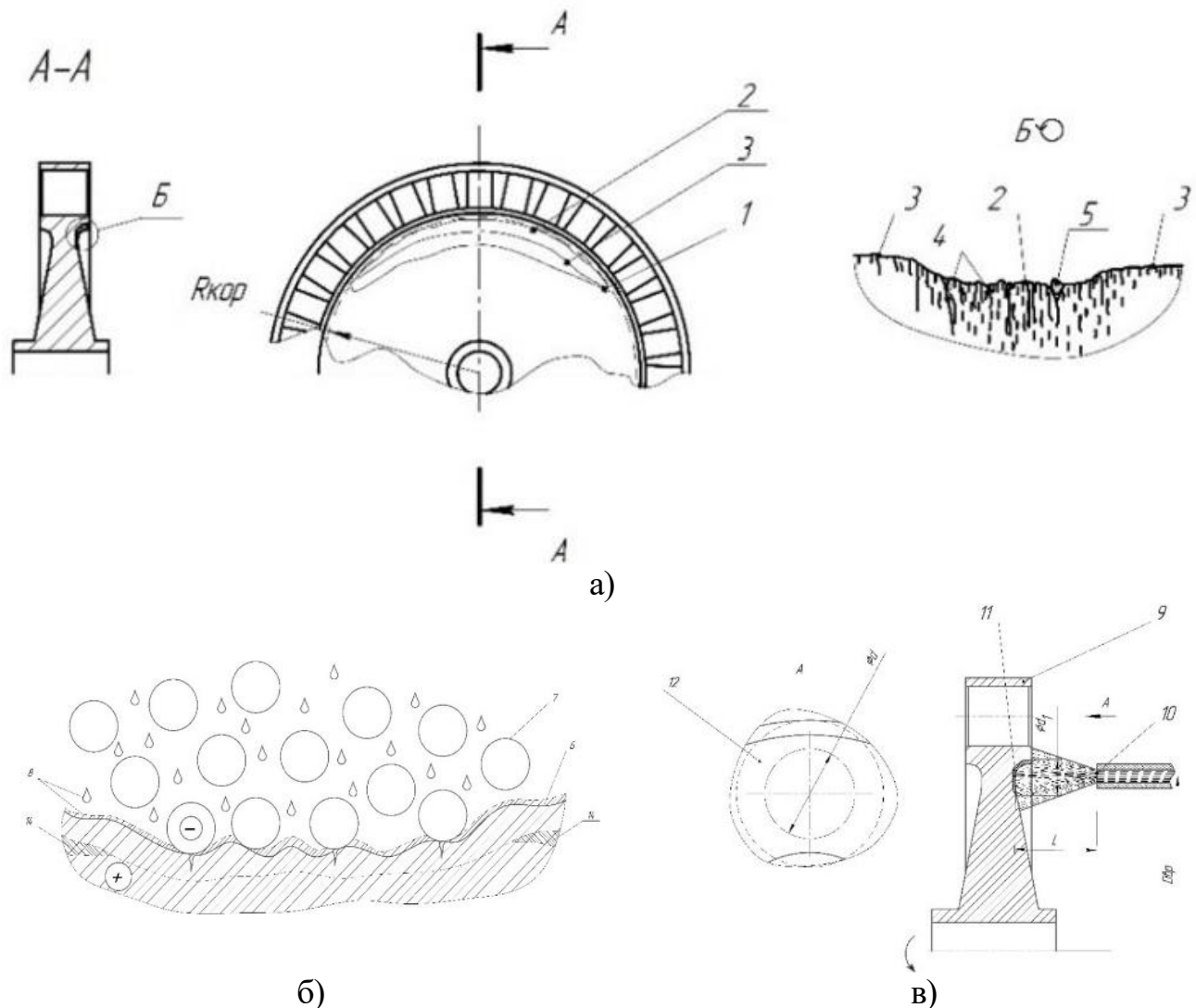


Рис. 3. Схема комбинированной обработки после доводки ротора:
 а) исходная поверхность после доводки ротора; б) процесс комбинированной обработки участка доводки; в) схема процесса обработки

На локальном участке 1 произвольной формы (рис. 3, а), имеющем заниженную относительно остальной поверхности зону 2 и переходную зону 3, микротрещины 4 в поверхностном слое после ручной локальной зачистки по результатам балансировки могут выходить на поверхность или оставаться замкнутыми в материале подповерхностного слоя и выходить на поверхность в процессе эксплуатации

изделия под действием знакопеременных нагрузок и высокочастотной вибрации. Трещины, проявившиеся на поверхности, забиваются на входе частицами 5 металла или абразива при зачистке. Затем эти частицы в условиях экстремальных знакопеременных эксплуатационных нагрузок в водородосодержащих средах еще глубже расклинивают трещину, чем резко снижают работоспособность деталей роторной группы.

Формирование требуемых эксплуатационных свойств поверхностного слоя в местах зачистки проходит в несколько этапов. Во-первых, на исходную дефектную поверхность 6 в самом глубоком месте зачистки (рис. 3, б) по направлению к ней под углом не более 90° подают стальные микрошарики 7 высокой твердости и более крупной фракции (0,25 мм), которые деформируют и осаживают выступы и залечивают микродефекты. Наличие жидкостной токопроводящей среды 8 препятствует перегреву мест соударений гранул с поверхностью и образованию остаточных напряжений растяжения, а также ускоряет процесс удаления частиц 5 за счет явления анодного растворения материала. В качестве газожидкостной слабопроводящей среды используют сжатый воздух и техническую воду. Так как весь ротор конструктивно состоит из тел вращения, то обработка проводится по схеме с вращением детали 9 относительно среза сопла 10 (рис. 3, в). При этом срез сопла 10 устанавливают на расстоянии L от обрабатываемого участка 11, при котором диаметр ядра распыла d равен наибольшему расстоянию поперечного сечения d_1 заниженной зоны 2 участка 1, чтобы пятно распыла 12 перекрывало наибольшее поперечное сечение переходной зоны 3. При этом образуется поверхностный наклеп материала 13, интенсивность которого плавно снижается от заниженной зоны к переходным границам участка 1 за счет меньшей энергии удара микрошарика о поверхность на периферии пятна распыла. Чтобы интенсивный наклеп приходился на заниженную зону участка и в продольном направлении при прохождении относительно среза сопла нарушенной поверхности от исходного состояния, обороты шпинделя установки снижаются с 5 до 2 мин^{-1} , повышая время контакта микрошариков на выбранном участке поверхности. В итоге наклеп распределяется равномерно, так как в переходной зоне 3 он объединяется с остаточным наклепом 14, наследованным от предыдущей операции упрочнения до начала балансировки.

На втором этапе используется более мелкая, смешанная в равной пропорции, фракция микрошариков менее 0,1 мм с газожидкостной средой, но без наложения тока. При этом завершается выравнивание наклепа 15 и микрорельефа поверхности, а также формирование в тонком поверхностном слое материала остаточных напряжений сжатия. Выравнивание микрогеометрии зависит от размеров микрошариков и сплошности покрытия поверхности пластическими отпечатками, которая за счет смешанной фракции составляет не менее 95 %. Требуемые технологические режимы локальной упрочняющей обработки настраиваются с помощью имитатора на плоских пластинах для каждой партии деталей.

В третьей главе на базе выдвинутых гипотез и разработанного способа (глава 2) исследован механизм обработки, в котором воздействия рассматриваются как обобщенный управляемый процесс формирования требуемых стабильных показателей технологической системы локальных участков поверхности сложного

профиля. Сущность проблемы технологического обеспечения локальной комбинированной обработки состоит в том, что дефектный поверхностный слой образуется при механической полировке с помощью абразивного инструмента с внедрением частиц абразива в поверхностный слой детали и появлением приповерхностных внутренних микротрещин и растягивающих напряжений. Нарушения физико-механического состояния материала имеют ненормируемую величину распространения с переходными зонами (рис. 1 и 3, а).

Поэтому при выравнивании качества балансируемых роторов отделочно-упрочняющей обработкой учитываем следующие характерные составляющие:

- в газожидкостной среде микрошарики находятся в свободном состоянии, а на профилированных инструментах или оснастке (накатниках, бойках) они жестко позиционированы. Вследствие этого микрошарики взаимодействуют с упрочняемой поверхностью любыми доступными в момент соударения своими элементами, а не однозначно ориентированной частью, следовательно, форма микрошарика должна быть максимально округлой;

- один микрошарик воздействует на упрочняемую поверхность с постоянной по значению силой, основная причина деформации при этом вызвана механическим давлением, поэтому усилие в контакте поддерживается около довольно постоянных величин;

- при обработке связанным (профилированным) инструментом плотность контактов с поверхностью будет ниже, чем пучка микрошариков на участке контакта потока газожидкостной среды с поверхностью детали по причине невозможности плотной фиксации отдельных инденторов в оснастке;

- газожидкостная среда с технической водой и металлическими микрошариками при наложении электрического тока будет обладать слабой, но стабильной, проводимостью.

Механизм комбинированного воздействия возникает из двух физических процессов, происходящих одновременно, - механического контакта микрогранул с поверхностью и анодного растворения материала при низких напряжениях, которое происходит под действием тока в слабопроводящей жидкой пленке технической воды, подаваемой в зону обработки в распыленном до капельной фракции виде одновременно с микрогранулами. Разреженная капельная фракция жидкостной составляющей практически не мешает микрогранулам получать от напора сжатого воздуха кинетическую энергию, достаточную для деформирования и сглаживания микровыступов, и подается в зону обработки отдельно от микрогранул. Так как микрогранулы подают в зону обработки струйным методом, то и параметры процесса изменяются регулированием суммарного расхода сжатого воздуха на одно пятно распыла по времени полного насыщения деформацией. Конкретную концентрацию капельной фракции устанавливаем экспериментально на настроечном имитаторе, исходя из обеспечения постоянной жидкостной пленки. При моделировании процесса принимаются исходные данные: физико-механические свойства материала микрогранул и детали; исходная и требуемая величина наклепа поверхностного слоя, и высота микронеровностей. Граничными условиями являются: предельно достижимые значения наклепа или высоты неровностей после обработки в условиях экранирования обрабатываемой среды; предельные значения

давления в потоке обрабатывающей среды, определяемые расходом сжатого воздуха и концентрацией микрогранул. Основным показателем импульсного механического воздействия на поверхность является скорость ее деформации. При твердых сферических частицах описанным радиусом $R_{мш}$, контактирующих с деталью на скоростью $V_{мш}$, деформироваться она будет в соответствии с отношением $V_{мш}/R_{мш}$.

Средняя скорость шариков при использовании газожидкостной среды:

$$V_{cp} = k_{kc} k_{mk} q_{гж} / S_{п} \quad (1)$$

где $q_{гж}$ – расход газожидкостной среды;

k_{kc} – коэффициент концентрации газожидкостной среды учитывающий влияние на скорость контактирования;

$S_{п}$ – площадь сечения потока газожидкостной среды;

K_{mk} – коэффициент комкования микрошариков в потоке газожидкостной обрабатывающей среды. ($k_{mk}=0,7-0,85$).

При этом шарик должен достичь величину кинетической энергии, необходимой для обеспечения процесса деформирования, порядка 8×10^4 мм в секунду. Таким образом, параметром регулирования является расход обрабатывающей среды и, следовательно, скорость деформирования микровыступов обрабатываемой поверхности. Условие, исключающее перенаклеп:

$$\delta_{пл} < \delta_{плmax} < \sqrt{\frac{2}{3\bar{P}}} \frac{VL^2}{32h_{об}}, \text{ мм}, \quad (2)$$

где L – длина образца, мм;

$h_{об}$ – толщина образца, мм.

Среднее давление $\bar{P}$ при соотношении $E/\sigma_T R \leq 36$ обеспечивает получение вмятины размером $0,004R$ для сталей, где отношение модуля текучести к модулю упругости $\sigma_T/E = 0,0024$. Вследствие того, что вероятность повторного удара микрошарика в одну и ту же точку поверхности составляет не менее 95%, а гарантированное давление, при достижении которого происходит необратимое деформирование, $\bar{P} = 3\sigma_T$, при расчете сил в зоне контакта необходимо использовать коэффициент $k_{ид}$, учитывающий степень исходной деформации поверхности при предыдущем упрочнении. С учетом этого наследования усредненная величина контактного давления

$$P_{кр} = \frac{3}{4} \frac{\pi \bar{P} d_{ш}^2 k_{ид}}{4} = \frac{9\pi \sigma_T d_{ш}^2 k_{ид}}{4}, \quad (3)$$

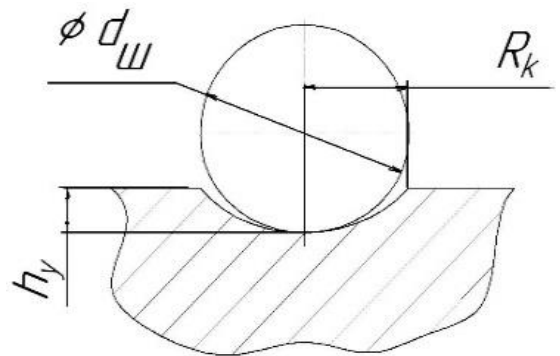


Рис. 4. Схема упругопластического контактирования шарика с поверхностью

где $k_{ид}$ – коэффициент, учитывающий степень исходной деформации поверхности.

Выражения (1) и (2) упрощенно отражают начальную стадию деформирования для величины давления в контакте до $3\sigma_T$, для дальнейших расчетов следует учитывать их энергетическую составляющую. У частицы размером не более 200 мкм малая масса, но из-за низкой теплопроводности контактирующих материалов необходимо присутствие жидкости для исключения от перегрева поверхности и удаления продуктов обработки. При ударе шарик оставляет на поверхности отпечаток, приведенный радиус которого R_k связан с кинетической энергией соотношением:

$$mV^2 = \pi P_d R_k^4 / 2d_{ш}, \quad (4)$$

где m – масса шарика;

P_d – динамическое давление ($P_d = \rho_{гж} V^2 / 2$);

$\rho_{гж}$ – плотность газожидкостной среды.

Уравнение баланса кинетической энергии $K_{э,мкш}$ микрошарика в потоке с учетом экспериментальных исследований:

$$K_{э,мкш} = mV^2 / 2 - cP_{св} - cP_{трп} - ymg,, \quad (5)$$

где c – ускорение потока;

$P_{св}$ – сила сопротивления газожидкостной токопроводящей среды;

$P_{трп}$ – сила трения в потоке;

y – вертикальное отклонение микрошарика в потоке.

В жидкой токопроводящей среде шарик достигал скорости при встрече с поверхностью детали, вращающейся в горизонтальной плоскости вокруг своей оси, не более 10-20 м/с вместо ≈ 80 м/с – в воздушном потоке, так что не удавалось разрушать образовавшуюся на поверхности окисную пленку и эффективно продолжать процесс деформирования поверхностного слоя. Введение вместо воды газожидкостной среды в поток мирошариков позволило повысить их скорость в момент контакта до 55 м/с по нескольким причинам: снизилось до 17% сопротивление окружающей среды (воздуха) и на 22 % трение в потоке из-за уменьшения его плотности; газовая среда, обладающая определенной несущей способностью в потоке, снижает на 4 % влияние силы тяжести. В результате микрошарик начинает пробивать окисную пленку, которая предварительно частично разрушается анодным низковольтным растворением. На первом этапе заряженные отрицательно гранулы более крупной фракции воздействуют на микровыступы, удаляя их за счет механического съема. При этом создается наклеп в вершинах неровностей, что усиливает эффект избирательного анодного растворения и поверхность выравнивается. Экспериментально установлено, что вычитаемые элементы выражения (5) составляют не более 25% от $K_{э,мкш}$ и учитываются при проведении расчетов получаемым экспериментально коэффициентом энергоемкости $k_э = 2K_{э,мкш} / mV^2$. С учетом этого получаем формулу определения основного управляющего параметра:

$$Q = \frac{3600VF_c R_k^2}{k_{гк} k_{мкш} k_{э} d_{ш}^2} \sqrt{\frac{3\sigma_{г} k_{ид}}{m}}. \quad (6)$$

Произвольно изменять собственно расход обрабатывающей среды мы не можем, так как он ограничен диаметром сопла и процессом начала и окончания эжекции. Экспериментально определено, что расход оптимально обеспечивает процесс эжекции на нашей установке в пределах изменения давления сжатого воздуха 0,2-0,4 МПа. Но изменяя суммарный расход обрабатывающей среды по времени упрочнения, мы уменьшаем или увеличиваем количество контактов микрошарика с поверхностью, выравнивая наклеп и шероховатость на переходных участках. За счет меньшей энергии микрошарика, находящегося на периферии пятна распыливания обрабатывающей газожидкостной среды, интенсивность контактирования уменьшается, а поверхностный наклеп плавно снижается от наиболее заниженной зоны ближе к границам переходной зоны на зачищенном участке.

При прохождении перед газожидкостным потоком участков детали в исходном состоянии, скорость вращения увеличивается, снижая число пластических отпечатков микрошариков на локальном участке, поэтому наибольшая степень наклепа приходится на заниженные и переходные зоны зачищенной поверхности. Таки образом в переходной зоне и на предварительно упрочненной поверхности новый наклеп объединяется с остаточным наклепом, наследованным от предыдущей операции упрочнения до начала устранения дисбаланса детали роторной группы. Поэтому наклепанный слой становится равномерно распределенным.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальной проверки результатов исследований режимов комбинированной обработки и формирования системы технологического обеспечения качества балансируемых роторов при локальном упрочнении поверхности после балансировки.

Экспериментальные исследования влияния режима и условий локальной комбинированной обработки плоских типовых образцов в газожидкостной токопроводящей среде на эффективность их поверхностного упрочнения проводились на установках эжекторного типа. Для исследования влияния режима и условий локальной комбинированной обработки плоских типовых образцов микрошариками на эффективность их поверхностного упрочнения использовались плоские образцы из закалённой углеродистой стали У8А (твёрдость HRC 45...50). Размеры образцов 20×70 мм и толщиной 1,2 мм.

Рабочая среда - стальные микрошарики диаметром от 50 до 300 мкм, имеющие форму, приближенную к сферической. При обработке использовался сопловой насадок с внутренним диаметром 10^{+1} мм. Расстояние L от среза соплового насадка до обрабатываемых образцов равна 150 ± 10 мм. Диаметр активной зоны потока рабочей среды (микрошариков) на этом расстоянии составлял 50 мм. Напряжение в системе – 2-10 В, расход газожидкостной слабопроводящей среды – 2 м³/мин. Мера эффективности поверхностного упрочнения плоских образцов – глубина наклёпа и величины остаточных напряжений сжатия. Поэтому величина $\delta_{об}$ прогиба образцов определена как целевой параметр эксперимента. Экспериментальное определение влияния времени обработки участка поверхности на прогибы образцов из различных материалов осуществлялось при одинаковых условиях обработки: $P=0,2$ МПа,

$\alpha=90^\circ\pm5^\circ$, $l=150$ мм, $n_{\text{вр}}=20^{-1}$ мин., $R_{a0}=0,6$ мкм (рис. 5). По результатам данного эксперимента, для повышения эффективности обработки деталей можно рекомендовать ограничение времени обработки одного пятна распыла до $t_1=20\pm5$ с. Образцы изготавливались из следующих материалов: У8А, ЭП741П, 07Х16Н6, ВНЛ-1М, 12Х18Н10Т.

Для определения оптимальной скорости оборотов служит график на рис. 7. Из графика очевидно, что оптимальный интервал оборотов от 2 до 5 мин⁻¹. Обработка турбины проводилась на эжекторной установке за два перехода (рис. 6) с креплением на шпинделе через диэлектрическую оправку со скользящим токоподводом низкого напряжения к детали. Шпиндель установки также изолирован подшипником скольжения, не проводящим ток от корпуса оборудования. Второй токоподвод замкнут на корпус установки. На первом переходе турбину обрабатывали микрошариками $\varnothing 250\pm20$ мкм с наложением тока низкого напряжения на следующих режимах: расстояние от соплового насадка между его торцом и поверхностью образца $L=200$ мм на диаметре вращения $D_{\text{вр}}=190$ мм; диаметр пятна распыла 40 мм; время обработки каждого соседнего участка по-

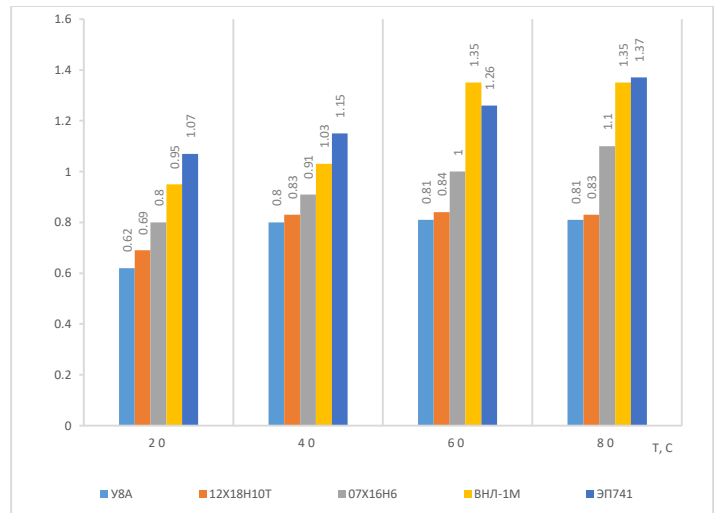


Рис. 5. График зависимостей прогибов плоских образцов из различных материалов от времени t_1 их обработки в одинаковых условиях ($P=0,2$ МПа, $\alpha=90^\circ\pm5^\circ$, $l=150$ мм, $n_{\text{вр}}=20^{-1}$ мин., $R_{a0}=0,6$ мкм)

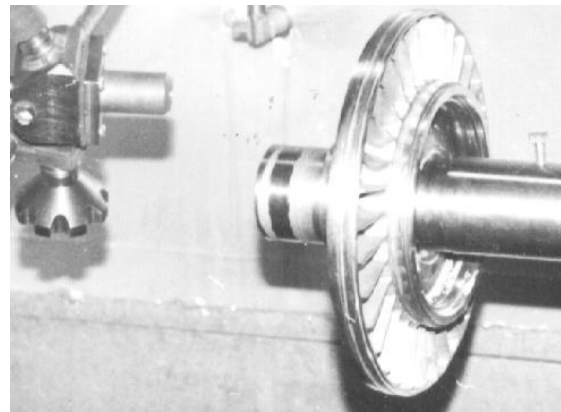


Рис. 6. Турбина в камере установки на диэлектрической оправке

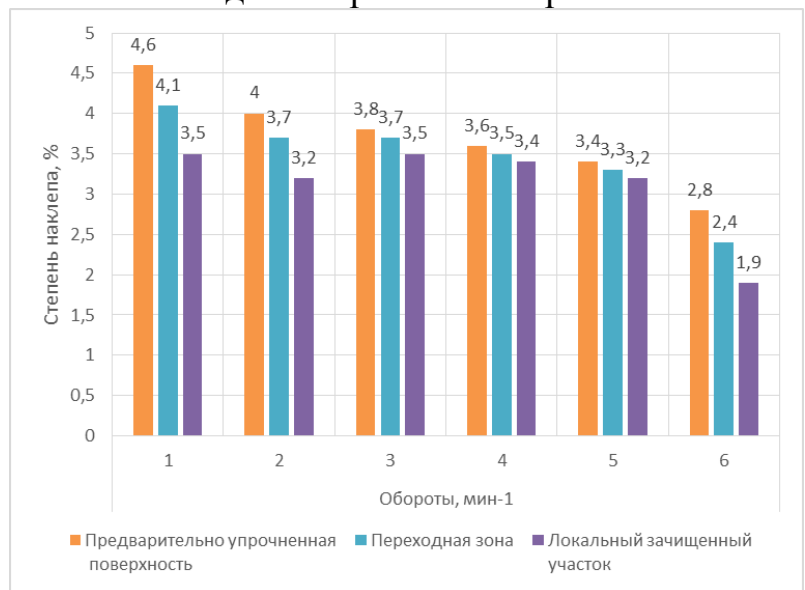


Рис. 7. График зависимостей степени упрочнения от скорости вращения детали

верхности 8-20 с; угол соударения потока микрошариков с поверхностью 90°; скорость вращения шпинделя установки 5 мин⁻¹ со снижением на нарушенных участках поверхности до 2 мин⁻¹; давление подаваемого сжатого воздуха 0,4 МПа; напряжение 4–6 В; расход газожидкостной слабопроводящей среды 1,5–2 м³/мин.

Последующая обработка проводилась смесью микрошариков диаметрами 50 и 100 мкм. Режимы: расстояние от соплового насадка между его торцом и поверхностью образца L=200 мм на диаметре вращения D_{вр}=190 мм; диаметр ядра пятна распыла d=40 мм; время обработки каждого соседнего участка поверхности – 10 с; угол соударения потока микрошариков с поверхностью 90°; скорость вращения шпинделя установки 10 мин⁻¹; давление подаваемого сжатого воздуха 0,2 МПа; расход газожидкостной слабопроводящей среды 1–1,3 м³/мин.

Газожидкостная слабопроводящая среда состояла из воздуха и распыленной до капельной фракции технической воды, являющейся слабым проводником. В качестве микрошариков использовались сферические гранулы из сплава ЭП741, идентичного материалу турбины с целью исключения шаржирования поверхности нежелательными химическими элементами, например, - углеродом. После обработки поверхности в течение 15 минут наклеп поверхностного слоя составил 2÷3,5 %, что подтверждает результаты и отвечает условиям по эксплуатации.

Расчет технологических режимов:

1. Выбор диаметра микрошариков с учетом рис. 3, мм:

$$d_{ш} = 2R_k = \frac{R_k^2}{h_y}, \quad (7)$$

где R_k – средний радиус вмятины (лунки) на поверхности;
 h_y – глубина отпечатка микрошарика.

В результате опытной обработки образцов-свидетелей локальной комбинированной обработки микрошариками полученные показатели качества поверхности сравниваем с расчетными значениями и корректируем по стандартному ряду нормированных величин. Такую же методику применяем для назначения фракции микрошариков.

2. Показатели качества поверхности обрабатываемых деталей роторов после балансировки устанавливаем из конструкторской документации.

Показатели качества используют как исходные данные для расчетов режимов локальной комбинированной обработки с учетом (3.55) и (3.60) при условии, что шероховатость обрабатываемой детали отвечает требованиям конструкторской и технологической документации.

3. Машинное время локальной комбинированной обработки рассчитываем по формуле:

$$t_{маш} = \pi \left(\frac{D_{обср}}{d_{p1} n_{max}} - \frac{L_{зон}}{d_{p2} n_L} \right), \quad (8)$$

где $D_{обср}$ – средний диаметр зоны съема металла при балансировке ротора, мм;

$L_{зон}$ – длина участков съема металла по средней линии, мм;

d_{p1} и d_{p2} – эффективное ядро распыла микрошариков на общем и локальном участках соответственно, зависящее от параметров эжекции, мм (определяется экспериментально на имитаторе).

$n_{\max}$ – максимальное число оборотов детали при прохождении уже ранее упрочненных участков поверхности, об/мин⁻¹;

n_L – число оборотов детали при прохождении локальной зоны обработки поверхности, об/мин⁻¹.

Для уточняющих технологических расчетов в общем виде $n = \pi D_o / t_{yc} dn_d$, где n_d – количество пятен контакта от ядра распыла потока диаметром d , укладываемых на диаметре D_o , находящемся напротив соплового насадка при обработке.

Время обработки участка пятна распыла t_{yc} определяется экспериментально по величине прогиба настроечного образца в имитаторе.

6. Если требуется снизить шероховатость с учетом исходной величины микронеровностей ΔR_{z0} за счет удаления микронеровностей ΔR_{z1} и ΔR_{z2} то время обработки элементного участка (см. главу 3):

$$t_{yc} = \frac{K_{эж} \pi R^2 \delta_{nl} (\Delta R_{z1} + \Delta R_{z2})}{F \frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi U K_{aP} K_{my}} \cdot N \quad (9)$$

Проектирование технологического процесса локальной комбинированной обработки микрошариками поверхности деталей ротора включает основные этапы:

1. Разработка:

- проверка на технологичность конструкции детали для оценки возможности проведения локальной комбинированной обработки микрошариками поверхностей;

- для проведения операции локальной комбинированной обработки производят заказ или подбор оснастки под параметры технологического оборудования, параметры рабочей среды и микрошариков: материал, форма и размер;

- расчет режимов локальной комбинированной обработки по предложенной методике, используя исходные данные из конструкторской и технологической документации;

- обучение и аттестацию исполнителей для выполнения локальной комбинированной обработки;

- проверка исправности и работоспособности технологического оборудования и приборов;

- отладка технологических наладок с помощью оснастки-имитатора, настройка режимов на первой детали из партии;

- анализ достигаемых показателей качества, соотношение их с расчетными значениями;

- согласование, оформление и утверждение технологической документации на проведение опытных работ.

2. Освоение:

- штатная обработка первой детали из партии по спроектированной технологической документации, контроль показателей качества методом сравнения или с использованием специального измерительного инструмента и приборов;
- разработка предложений по уточнению технологической документации по результатам контроля результатов упрочнения локальных участков;
- согласование и проведение корректировок в опытный техпроцесс локального упрочнения микрошариками;

3. Внедрение:

- окончательное корректирование режимов упрочнения по результатам контроля качества локального упрочнения товарной партии деталей;
- на основании правил метрологии проведение выборы методов и средств контроля операции упрочнения в производственных условиях;
- согласование акта внедрения технологии локального комбинированного упрочнения микрошариками в производственных условиях;
- выпуск типовых технологических процессов и операций, технологических инструкций.

Заключение

Спроектирован и реализован процесс комбинированной локальной обработки токопроводящими микрошариками с выравниванием физико-механических свойств нарушенного поверхностного слоя материала. Впервые для этих целей использованы микрошарики различных фракций с газожидкостной токопроводящей средой. Разработанная методика и режимы позволяют реализовать локальный комбинированный процесс поврежденных участков при балансировки и доводки поверхностей лопаточных деталей с целью получения стабильных показателей качества балансируемых роторов и ресурса работы высокооборотного ротора.

Общие выводы

1. Установлены технологически нормируемые условия для сохранения в процессе доводки высокооборотных (1000 с^{-1}) роторов стабильных физико-механических свойств и ресурса нагруженных поверхностей, достигнутых на предыдущих операциях изготовления лопаточных деталей, особенно при последующей балансировке с локальным снятием материала в зоне концентраторов напряжений.

2. Установлен механизм воздействия на технологический процесс доводки ротора и его составляющих, что позволило разработать качественные и количественные способы управления процессом формирования и выравнивания физико-механических свойств и качества поверхностного слоя для повышения ресурса работы как непосредственно для участков зачистки, так и для переходных зон с различной геометрией микропрофиля.

3. Научно обоснована возможность технологического обеспечения стабильных показателей шероховатости и степени наклепа (разброс значений 2,5–4,0 %), что позволяет расширить возможности создателей новой техники по показателям работоспособности и ресурса высокооборотного ротора в экстремальных условиях его эксплуатации.

4. Разработаны режимы комбинированной обработки, включающие механическое воздействие и анодное растворение, что обеспечивает требуемые технологические показатели процесса: время обработки локального участка поверхности 8–20 с; угол соударения потока микрошариков с поверхностью $\alpha=90^\circ\pm 15^\circ$; скорость вращения шпинделя установки 2–5 мин⁻¹; давление сжатого воздуха в струйном аппарате 0,2–0,4 МПа; рабочая среда – металлические шарики сферической формы фракциями от 50 до 250 мкм в газожидкостной токопроводящей среде, расход которой – 1,3–2 м³/мин; напряжение источника питания 4–6 В. Технологические показатели процесса: для коррозионностойких сталей $R_a=0,16\text{--}0,32$ мкм, разброс по степени наклепа ± 3 %; для заготовок из жаропрочных сплавов $R_a=0,16\text{--}0,25$ мкм, разброс степени наклепа ± 2 %. Достигнутые результаты превышают получаемые ранее.

5. Разработана технология комбинированной обработки локальных участков в местах балансировочных зачисток, сочетающая в едином управляемом процессе механическое и электрохимическое воздействие и состоящая из этапов последовательного, чередующегося и совместного воздействия на поверхность различных фракций микрошариков, ставшая основой создания нового способа обработки, защищенного патентом.

6. Разработанные режимы и технологический процесс прошли промышленную проверку при создании высокооборотных роторов, эксплуатируемых в водородосодержащих средах в жестких условиях по ресурсу работы (не менее 10^7 циклов нагружений при частоте 1000 с⁻¹). Испытания лопаточных деталей в условиях эксплуатации показали снижение нештатных разрушений на 11 %, что подтвердило правомерность результатов исследований.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Сухочев Г. А. Технологические аспекты балансировки высокооборотных роторов / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников, С. Н. Коденцев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2016. – № 2 (316). – С. 99–105.

2. Сокольников В. Н. Технологическое обеспечение эксплуатационных показателей при доводке роторов комбинированной обработкой / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2018. – № 3 (159). – С. 132–136.

3. Сокольников В. Н. Исследование режимов комбинированной упрочняющей обработки при доводке высокооборотных роторов / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2019. – № 6. – С. 134–137.

4. Сокольников В. Н. Комбинированная обработка лопаточных деталей при доводке быстроходных роторов / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. – № 6. – С. 15–19.

5. Сокольников В. Н. Исследование поверхностного слоя детали после комбинированного механоэлектрохимического процесса упрочнения / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, С. В. Усов, И. П. Точилин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – т. 15. – № 12 (180). – С. 555–560

6. Сухочев, Г. А. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей / Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов, В. Н. Сокольников // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 7 (109). – С. 20-23.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах научного цитирования (Scopus):

7. Boldyrev A. Achievement of Required Surface Roughnesses in Complex Profile Channels by Dynamic Combined Processing [Электронный ресурс] / A. Boldyrev, G. Sukhochev, A. A. Boldyrev, V. Sokolnikov // International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems» (DTS) (Rostov-na-Donu, Russia, September 12-14, 2018): MATEC Web of Conferences 226, 01021 (2018) DTS-2018; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822601021>.

Статьи и материалы конференций

8. Сухочев Г. А. Доводка узких каналов комбинированными методами / Г. А. Сухочев, Д. В. Силаев, В. Н. Сокольников // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., – Воронеж: ВГТУ, – Вып. 9. – 2015. – С. 4-14.

9. Сухочев Г. А. Технологические вопросы обеспечения качества динамической балансировки роторов / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников, С. Н. Коденцев // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. № 2 (16). – С. 66-73. Режим доступа: http://vestnikvgtu.ru/arhiv/2016/2/10_2_16_2016.pdf.

10. Сокольников, В. Н. Технологические вопросы обеспечения качества динамической балансировки роторов / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. тр. международной науч.-техн. конф., посвящённой 60-летию ЛГТУ: Липецк, – 2016 г. - т. 1, –ч. 1. – С. 238-244.

11. Сухочев Г. А. Технология балансировки высокооборотных роторов ЖРД / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ВГТУ, – 2016. – Вып. 10. – С. 27-39.

12. Сухочев Г. А. Технологическое обеспечение качества балансировки и доводки роторов ЖРД / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников, С. Н. Коденцев, З. И. Бевзюк // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ВГТУ, – 2017. – Вып. 11, – С. 36-46.

13. Сокольников В. Н. Повышение работоспособности лопаточных деталей быстроходных роторов комбинированными методами / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, Д. В. Хицов // Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике (ТМ-18): сб. науч. тр. X междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, ВГТУ, – 2018 – С. 13-16.

14. Сухочев Г. А. Параметры технологического процесса получения качественного поверхностного слоя деталей роторной группы / Г. А. Сухочев, В. Н. Со-

кольников, А. М. Некрылов // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ИПЦ «Научная книга», – 2019. – Вып. 12. – С. 83-86.

15. Сокольников В. Н. Повышение работоспособности высокооборотных роторов в местах доводки комбинированными методами / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, А. В. Норман // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, – 2019. – С. 229-232.

16. Сокольников В. Н. Моделирование режимов комбинированной обработки при доводке высокооборотных роторов / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2019): сб. тр. X Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, Шерегеш, – 2019. – С. 267–273.

Патенты на способы и устройства

17. Патент №2634398 Российская Федерация, МПК В23Н 5/06 (2006.01). Способ комбинированной обработки узких каналов деталей: № 2015101018; заявл. 12.01.2015; опубликовано 26.10.2017 / Сухочев Г. А., Родионов А. О., Коденцев С. Н., Силаев Д. В., Сокольников В. Н.; заявитель ВГТУ. – 6 с.; ил. – Текст: непосредственный.

18. Патент №2709072 Российская Федерация, В23Н 5/06 (2006.01), В24В 39/00 (2006.01). Способ упрочняющей обработки локальных участков поверхностей деталей роторов: № 2019123080; заявл. 17.07.2019; опубликовано 13.12.2019 / Сухочев Г. А., Сокольников В. Н., Некрылов А. М.; заявитель ВГТУ – 8 с.; ил. – Текст: непосредственный.

Подписано в печать 2 июля 2021 года.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № 93

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14