На правах рукописи

Сарсенгалиев Айдос Миргенгалиевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УДАЛЕНИЯ ОКСИДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ С ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ДЕТАЛЯХ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ СОЧЕТАНИЕМ КАВИТАЦИИ И КОНТАКТНОГО ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЯ

Специальность 05.02.07 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Саратов 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Бекренёв Николай Валерьевич.**

Официальные оппоненты: **Фатюхин Дмитрий Сергеевич**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, город Москва;

Агапов Сергей Иванович
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», город Волгоград.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», УлГТУ ФГБОУ ВО, город Ульяновск.

Защита состоится «4» октября 2018 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.028.06, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте www.vstu.ru

Автореферат разослан «_»_____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Крайнев Дмитрий Вадимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современное транспортное и энергетическое машиностроение характеризуется применением в перспективных двигателях, топливно-распределительных системах и устройствах транспортировки энергоносителей (например – природного газа) изделий, обладающих сложным конструктивом.

Транспортировка природного газа обеспечивается газоперекачивающими агрегатами (ГПА). В настоящее время используется два типа ГПА: с насосами с электроприводом и с насосами, в качестве привода которых используются конверсионные газотурбинные двигатели. Одними из основных элементов газотурбинных установок ГПА являются камеры сгорания. Паспортными данными регламентируются определенная мощность, частота вращения ротора турбин высокого и низкого давления, а также выбросы в окружающую среду соединений классов COx и NOx. Опыт эксплуатации горелочных устройств на компрессорных станциях выявил некоторые особенности применения данных систем. Горелочные устройства имеют до 140 рабочих разнонаправленных отверстий малого диаметра (0,8-1,0 мм). В процессе эксплуатации происходит уменьшение проходного сечения отверстий и каналов вследствие образования оксидного поверхностного слоя и отложения соединений сопутствующих горючему газу элементов на стенках каналов и отверстий. Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, что приводит к снижению фактической мощности ГПА, а также повышенному содержанию соединений COx и NOx, что сказывается отрицательно на экологических показателях агрегата. Отмеченные нарушения проявляются задолго до выработки горелочным устройством паспортного ресурса, что вызывает необходимость замены комплекта этих устройств на новый и дополнительные финансовые расходы для компрессорной станции, что в конечном итоге вызывает рост оплаты услуг по транспортировке газа для потребителей.

Решить указанные проблемы можно путем восстановления диаметра проходного сечения отверстий и каналов изделий путем удаления оксидного поверхностного слоя.

В различных отраслях машино- и приборостроения, начиная с середины XX века, успешно применяется для разрушения тонких поверхностных слоев и загрязнений метод ультразвуковой очистки, который является наиболее эффективным и качественным среди других методов (химического, механического, плазменного и др.) поверхностной обработки путем создания условий для кавитации в технологической жидкости. Научные аспекты ультразвуковой кавитации и ее применения при обработке в жидких средах изучены Б.А. Агранатом, Ф.Ф. Брониным, В.М. Приходько, В.Н. Хмелевым, Е.С. Киселевым, М.А. Промтовым, Д.С. Фатюхиным, , М.Г. Руденко, И.А. Сироткиным, и др.. Разработана теория ультразвуковой кавитации при различных температурных условиях, плотностях технологических сред, интенсивности ультразвука и его частоты.

Исследовано и доказано положительное влияния частотной модуляции ультразвуковых колебаний на эффективность ультразвуковой обработки и очистки. Разработаны и выпускаются серийно ультразвуковые ванны различной мощности и вместимости, а также автоматизированные моечно-очистные комплексы, в том числе использующие многочастотное ультразвуковое воздействие и «качание» частоты вблизи среднего заданного уровня. Однако, результаты данных исследований применимы в основном только для очистки внешних поверхностей или относительно «открытых» внутренних полостей. Процессы развития кавитации в малогабаритных «скрытых» внутри корпуса полостях и разнонаправленных каналах малого диаметра малоинтенсивны и не позволяют эффективно удалять поверхностный слой и связанные с ним загрязнения. Альтернативные ультразвуковые методы очистки таких поверхностей изучены недостаточно. Также не рассмотрены вопросы сохранения целостности тонкостенного собранного при помощи сварки изделия при воздействии на него мощного ультразвука, интенсивностью, достаточной для поверхностной обработки «скрытых» каналов. Изложенное позволяет считать тему данного диссертационного исследования актуальной.

Тема диссертационного исследования поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (контракт №0015494 «Разработка ультразвуковой технологии восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов»).

Цель работы: повышение эффективности процесса увеличения проходного сечения отверстий и каналов путем ультразвукового разрушения оксидных слоев и их удаления с поверхности закрытых полостей и каналов малого диаметра в деталях машиностроения сложной формы типа горелочных устройств на основе обоснования и разработки технологии обработки, включающей сочетание локализованного контактного вибровоздействия в рабочей зоне и кавитации с учетом собственных резонансных частот изделия.

Задачи работы:

1. Определение оптимальной схемы и закономерностей процесса ультразвукового удаления оксидных поверхностных слоев в отверстиях и каналах малого диаметра, расположенных внутри корпуса изделия, обоснование рациональных технологических режимов;
2. Разработка технологии комбинированной ультразвуковой обработки, обеспечивающей эффективное удаление оксидных поверхностных слоев одновременного воздействия на них вибрационных деформаций и кавитации технологической жидкости;
3. Оценка собственных частот колебаний типовых изделий и выявление распределения пучностей деформаций и звукового давления по корпусу на основе компьютерного моделирования;
4. Изучение влияния сообщаемых изделию ультразвуковых колебаний на величину деформаций и внутренних напряжений в элементах конструкции изделия и их сравнение с допускаемыми значениями;

5. Анализ химического состава поверхностного слоя и его распределения по каналам и полостям изделия и подбор технологических жидкостей;

6. Разработка предложений по созданию специальной установки комбинированной ультразвуковой поверхностной обработки внутренних полостей и каналов изделий машиностроения.

Объект исследований: детали машиностроения типа горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов с разнонаправленными внутренними полостями и каналами малого диаметра.

Предмет исследований: технологический процесс ультразвуковой поверхностной обработки полостей и каналов малого диаметра, закономерности разрушения и удаления оксидных слоев в результате сочетания эффекта ультразвуковой кавитации и локализованного контактного вибровоздействия.

Методы и средства исследований. Исследования проводили на примере горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам на специально разработанной установке с питанием от генератора УЗГИ1-2.5(1)(1.5)(2) производства ООО «Ультразвук-ТЕО» (г. Саратов) мощностью 1,0 кВт и частотой 22 кГц ±7,5%. Химический состав поверхностного слоя в каналах исследовали методом энергодисперсионного рентгенофлюоресцентного анализа при помощи растрового электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan), оснащенного химическим анализатором INCA PentaFETx3 (Oxford). Внешний вид поверхностей каналов и полостей оценивали при помощи компьютерного анализатора изображений АГПМ-6М. Измерение вибрационных и шумовых характеристик изделия и торца волновода в процессе очистки проводили при помощи компьютерного виброакустического комплекса ВК-01. Фактическую частоту колебаний напряжения генератора, поступающего на излучатели, измеряли частотомером Ч3-34. Амплитуду колебаний волновода на холостом режиме и под нагрузкой измеряли индуктивным датчиком с усилителем типа 214. Эффективность процесса оценивали по расходу воды объемом 2 л, заливаемой в центральный подводящий канал горелочного устройства. Интенсивность удаления оксидного слоя определяли путем взвешивания образцов-имитаторов до и после цикла очистки на электронных весах RM200 с точностью 0,0001 г.

Моделирование собственных частот колебаний изделия, полей внутренних напряжений и величин деформаций выделенного элемента изделия в зависимости от условий обработки выполняли методом конечных элементов в программной среде *APM Winmashine* (модуль *Structure-3D*).

Научная новизна:

1. Теоретически и экспериментально обоснован способ ультразвуковой поверхностной обработки труднодоступных полостей и каналов путем возбуждения ультразвуковых колебаний в корпусе изделия на частотах, обеспечивающих генерацию максимальных волновых деформаций в области локализации оксидных слоев, в сочетании с общим кавитационным

воздействием и с прокачкой через газоподводящие каналы и отверстия технологической жидкости.

2. Обоснованы модели полей напряжений и амплитудно-частотных характеристик вибраций, возникающих в изделии в процессе контактного вибровоздействия, позволяющие установить рациональный частотный диапазон и безопасные для соединений элементов изделия параметры динамических нагрузок, обеспечивающие высокоинтенсивное удаление оксидного слоя.

3. Установлены виброакустические параметры воздействия ультразвука на изделие сложной многоэлементной конструкции, позволяющие определить рациональные технологические режимы.

4. Изучена кинетика удаления оксидных слоев с поверхности скрытых полостей и каналов при внешнем контактном воздействии ультразвукового излучателя, позволившая обосновать рациональную схему оборудования.

Практическая ценность

1. Разработан технологический процесс увеличения проходного сечения отверстий деталей типа горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов, обеспечивающий до 97-98% эталонной пропускной способности за счет применения общего кавитационного и локализованного контактного вибровоздействия на резонансных для изделия частотах с прокачкой технологической жидкости через каналы.

2. Разработана конструкция устройства для ультразвуковой обработки на двух резонансных частотах, защищенная патентом RU № 2548344 (опубл. 20.04.2015 г.) и позволяющая практически реализовать технологическую схему с обеспечением максимальной интенсивности ультразвука в различных «скрытых» зонах изделия сложной формы.

3. Разработана принципиальная схема и технические предложения по конструкции специальной ультразвуковой установки с активным контролем изменения проходного сечения отверстий и каналов по расходу технологической жидкости, на основе которых изготовлен и внедрен опытный образец. На способ обработки и реализующую его установку получен патент RU № 2625465 (опубл. 14.07.2017 г.).

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности 05.02.07.

п. 2 Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий.

п. 3 Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки.

п. 6 Новые технологические процессы механической и физико-технической обработки и создание оборудования и инструментов для их реализации.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Способ комбинированной ультразвуковой поверхностной обработки внутренних полостей и каналов диаметром 1 мм и менее в изделиях сложной формы на частотах, определяемых на основе анализа виброакустических характеристик детали с учетом требуемого положения пучности колебаний.
2. Результаты экспериментальных исследований процесса комбинированной ультразвуковой поверхностной обработки внутренних полостей и каналов малого диаметра и полученные на их основе закономерности, устанавливающие связь амплитудно-частотных параметров ультразвука, собственной частоты колебаний изделия, времени обработки и значений увеличения пропускной способности каналов и отверстий.
3. Результаты внедрения: технологические режимы комбинированной ультразвуковой обработки - частота ультразвука 21,0 – 21,5 кГц при выходном токе генератора 1,0-1,2 mA, расход технологической жидкости 1,4-1,5 $м^3$/ч, температура жидкости 40-55^{0}С, позволившие обеспечить пропускную способность изделий до 97-98% эталонной и продлить их срок эксплуатации. Годовой экономический эффект из расчета на один комплект горелочных устройств составляет 162,7 тыс. руб.

Реализация результатов работы осуществлена путем применения обоснованной схемы и технологических режимов при проектировании в ОАО «НИТИ-Тесар» (г. Саратов) опытного образца автоматизированной установки комбинированной ультразвуковой обработки «Резонанс» (ХД № 568 15ед 223 от 27.03.2015 г.) и путем внедрения технологии в РММ Петровского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Саратов» в рамках ХД №370/683 от 11.09.2014 г.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 6-и международных и всероссийских научно-технических конференциях, а также научных семинарах Института электронной техники и машиностроения СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Экспериментальный образец установки для комбинированной ультразвуковой обработки горелочных устройств и технологический процесс экспонировались на 15-й юбилейной выставке оборудования, технологий и услуг в области энергетики «ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. 2013» (24-26 апреля 2013 г., г. Саратов) и на VIII Саратовском салоне изобретений, инноваций и инвестиций (19-20 сентября 2013 г., г. Саратов), по итогам которого были награждены дипломом II степени и серебряной медалью.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 12 научных работ, в том числе 3 работы в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ, а также 2 патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка

литературы из 109 наименований и 6 приложений, содержит 57 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложена общая методика исследований, отмечена научная новизна и практическая ценность результатов, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена актуальная для науки и практики задача удаления оксидных поверхностных слоев с внутренних (скрытых в корпусе) полостей и отверстий в деталях машиностроения на примере топливной аппаратуры и горелочных устройств газоперекачивающих турбинных агрегатов, проанализированы известные методы и схемы очистки внутренних полостей и отверстий, а также технологические возможности и физическая сущность процесса ультразвуковой очистки, рассмотрены методы и устройства, повышающие эффективность ультразвуковой очистки внутренних полостей и отверстий малого диаметра. Показано, что процесс ультразвуковой очистки не позволяет эффективно увеличивать проходное сечение отверстий и каналов во внутренних зонах изделий. Сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели исследований, и предложен подход к их решению:

- изучение химического состава поверхностного слоя отверстий и каналов с целью определения основного метода их разрушения и удаления;
- изучение распределения поверхностного слоя по поверхности каналов и отверстий; изучение форм собственных колебаний изделия при различных частотах и выявление частот, генерирующих такое распределение деформаций поверхности изделия, при котором пучности оказываются в зонах с наибольшей толщиной измененного поверхностного слоя;
- введение изделия в контакт с ультразвуковым преобразователем с определенным усилием и сообщение колебаний изделию на установленной на основе моделирования частоте для разрушения поверхностного слоя с одновременной кавитацией объема жидкости и ее прокачкой через каналы для эффективного вымывания отслоившихся его частиц.

Во второй главе выполнен анализ существующего метода ультразвуковой кавитационной очистки и предлагаемого метода контактной обработки в технологической жидкости с учетом скрытого характера измененного поверхностного слоя при допущении, что причиной разрушения последнего являются внутренние напряжения, возникающие под действием кавитации или, соответственно, изгибных высокочастотных колебаний поверхности, приводящих к многоцикловому знакопеременному нагружению сложных по составу поверхностных слоев, состоящих из адгезионнопрочной оксидной пленки и аморфных внешних углеродсодержащих слоев. При этом считали, что условием разрушения является превышение величины возникающих внутренних напряжений над величиной адгезионной прочности оксидного слоя. Получено выражение, связывающее величину напряжений с

амплитудой ультразвуковых колебаний и конструктивными особенностями объекта:

$$\sigma_{F1} = \frac{CA^{0,56}l}{0,1D^3(1-C^4)}, \quad (1)$$

где C – коэффициент динамической силы ультразвука, A – амплитуда ультразвуковых колебаний, l – длина элемента конструкции, подвергаемого воздействию, D – наружный диаметр элемента конструкции, $C_1 = d / D$ – соотношение диаметров очищаемого канала d и наружного диаметра.

Расчетом по зависимости получен график (рис. 1), позволивший установить диапазон параметров эффективной контактной обработки с учетом адгезионной прочности поверхностного слоя 12-15 Н/мм^2 (максимальные значения по априорной информации). Проведен анализ конструктивного исполнения типового изделия на примере горелочного устройства и распределения оксидных поверхностных слоев. Выполнено моделирование амплитудно-частотной характеристики изделий многоэлементной конструкции сложной формы и частотных гармоник. Выполнен анализ эпюр амплитуд колебаний горелочного устройства в представлении последнего частью ультразвуковой колебательной системы. На основе конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния изделия при ультразвуковом нагружении проведено определение рациональной интенсивности и схемы наложения ультразвука. Была принята объемная форма элементов в виде тетраэдра. Обоснована теоретически схема ультразвуковой обработки, сочетающая общее кавитационное и локализованное в рабочей зоне контактное воздействие с прокачкой технологической жидкости.

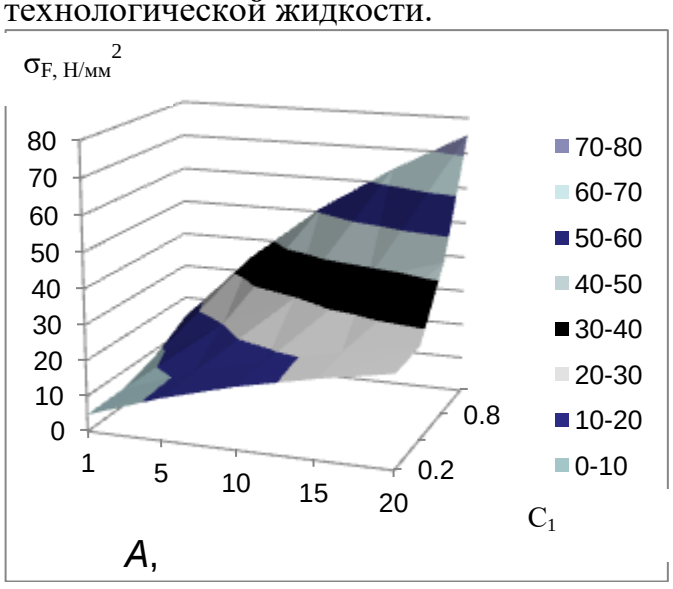
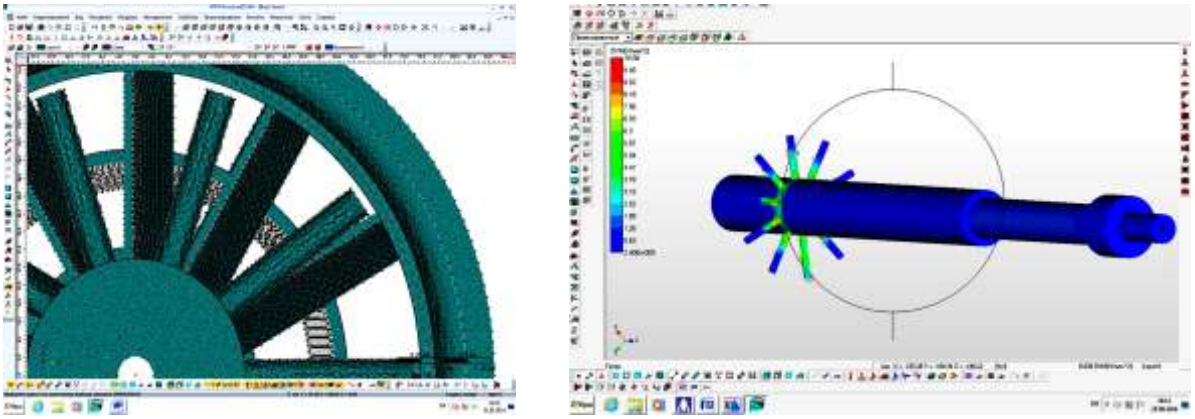


Рисунок 1. Изгибные напряжения σ_F в трубчатой конструкции, подвергнутой воздействию ультразвука, в зависимости от амплитуды A и соотношения диаметра канала и наружного диаметра C_1

В программной среде АРМ Winmashine проведено на твердотельной 3-D модели изделия определение собственных частот колебаний и выявлено положение их пучностей, установлено распределение полей деформаций и напряжений. По результатам анализа найдены режимы ультразвукового воздействия, при которых теоретически деформации в местах концентрации напряжений минимальны, а пучности амплитуды смещения располагаются вблизи областей максимальной концентрации оксидного поверхностного слоя.

Конечно-элементная сетка (сторона 3 мм) горелочного устройства в области газоотводящих трубок представлена на рис. 2а, карта изгибных деформаций при различных параметрах вибрационного нагружения горелочного устройства - на рис. 2б, принятая за оптимальную диаграмма форм собственных колебаний в ультразвуковом диапазоне частот – на рис. 3.



а *б*

Рисунок 2. Конечно-элементная сетка в области газоотводящих трубок (а) и карта деформаций в центральном теле и трубках (б)

При анализе форм колебаний на различных частотах звукового и ультразвукового диапазона видно, что на частотах 19000-20000 Гц заметны локальные деформации. При частотах порядка 21000 Гц (рис. 3) усиленные волновые процессы развиваются по всей длине горелочного устройства, включая хвостовую часть, центральный корпус, оболочку и газоотводящие трубки. Деформации доходят до 0,5 от максимальных. По результатам анализа данный режим признан наиболее целесообразным.

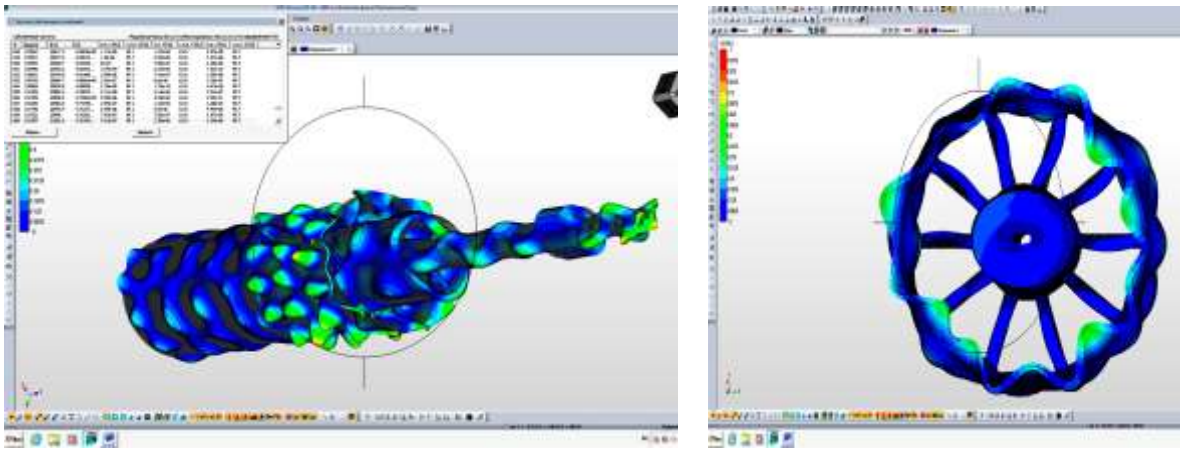


Рисунок 3. Колебания элементов горелочного устройства при частоте вынуждающей силы 21001 Гц

При частотах порядка 22000 Гц интенсивно деформируется центральный корпус, но трубки остаются мало деформированными, т.е. очистка внутренних полостей возможна лишь частично. При 23000-23300 Гц

происходит деформация, как центрального корпуса, так и трубок, но хвостовая часть остается мало затронутой деформациями.

Поскольку предлагаемая схема комбинированной ультразвуковой обработки предполагает воздействие ультразвука на само изделие, проведена оценка частот, при которых в теле изделия укладывается целое число длин волн, т.е. возможные условия резонанса. Установлено, что ближайшей к месту стыковки трубок и центрального тела является вторая пучность третьей гармоники (частота 20649 Гц). Расхождение от определенной путем компьютерного моделирования частоты 21001 Гц не превышает 1,7%. В дальнейшем была проведена экспериментальная проверка данного частотного диапазона.

В третьей главе приведена методика исследований, приведены результаты изучения распределения вибрационных и акустических полей в обрабатываемом изделии на примере периферийного горелочного устройства, проведены постановочные опыты по общей очистке и местной обработке на примере горелочного устройства ГПА. Выполнен анализ состава поверхностного слоя во внутренних полостях и отверстиях топливной и горелочной аппаратуры и причин, их вызывающих, выбран состав технологической среды. Изучено влияние технологических параметров (амплитуды и частоты колебаний излучателя и контактного усилия, интенсивности и направления прокачки технологической жидкости) на изменение пропускной способности горелочного устройства.

Анализ результатов иисследования химического состава поверхностного слоя в каналах горелочных устройств, демонтированных из двух различных ГПА, позволяет сделать следующие выводы. Химический состав в первой и второй пробах принципиально отличается содержанием углерода (во второй пробе примерно в два раза меньше) и различием в составе элементов (во второй пробе отсутствуют сера, кальций, хром, марганец, но присутствует титан); в первой и второй пробах содержится примерно одинаковое количество кислорода и железа; в обоих пробах содержится относительно меньше углерода и серы по сравнению с кислородом и железом, в то же время можно отметить разнообразие металлов. Из анализа состава поверхностного слоя следует, что элементы, характерные для углеводородного сырья и наиболее вероятные для присутствия в составе магистрального газа в качестве загрязнений, составляют не более 7-14 массовых % от других элементов. Поэтому было принято решение в целях повышения экологичности процесса не применять специальные химические растворы, а сосредоточиться на механическом виброразрушении оксидного поверхностного слоя и вымывании его частиц акустическими течениями и скоростным потоком прокачиваемой воды. Исследовали возможности обработки путем ультразвукового удаления оксидных слоев для увеличения проходного сечения кангалов горелочного устройства на основе определения сокращения времени набора давления воздуха, прокачиваемого через каналы, в герметичном баллоне. При этом рассматривали следующие возможные схемы:

- «традиционная» очистка за счет кавитации в объеме моющей жидкости, в которую помещено горелочное устройство;

- обработка с ультразвуковым нагружением горелочногог устройства, помещенного в технологическую жидкость, на оптимальной для кавитации частоте ультразвука;

- обработка с ультразвуковым нагружением горелочногог устройства, помещенного в технологическую жидкость, на частоте ультразвука, определенной на основе компьютерного моделирования и обеспечивающей колебания определенных зон корпуса.

Предварительные обобщенные результаты представлены на рис. 4. При каждом сочетании режимов проводили по 3 повторных опыта.

Установлено, что наибольшая эффективность обработки наблюдается на неоптимальной для интенсивной кавитации (в данных условиях) частоте около 21,5 кГц, при f < 21 кГц и f > 22,4 кГц эффективность процесса резко снижается. С целью выявления механизма данного факта исследовали кинетику удаления оксидного слоя из «скрытых» полостей и каналов при использовании объемной кавитационной очистки и контактного воздействия ультразвукового преобразователя. Полученные в результате обработки экспериментальных данных аппроксимирующие функции процессов имеют следующий вид:

$$\Delta Q_o = 0{,}0012A^{0{,}731}t^{0{,}165} \quad (2)$$

$$\Delta Q_K = 0{,}015A^{1{,}19}t^{0{,}238} \quad (3)$$

где ΔQ_o и ΔQ_K – соответственно изменение веса образцов-имитаторов после очистки по известной схеме объемной очистки и по предлагаемой схеме; A – амплитуда колебаний торца ультразвукового преобразователя; t – время очистки.

Результаты расчетов по (2) и (3) представлены на рис. 5

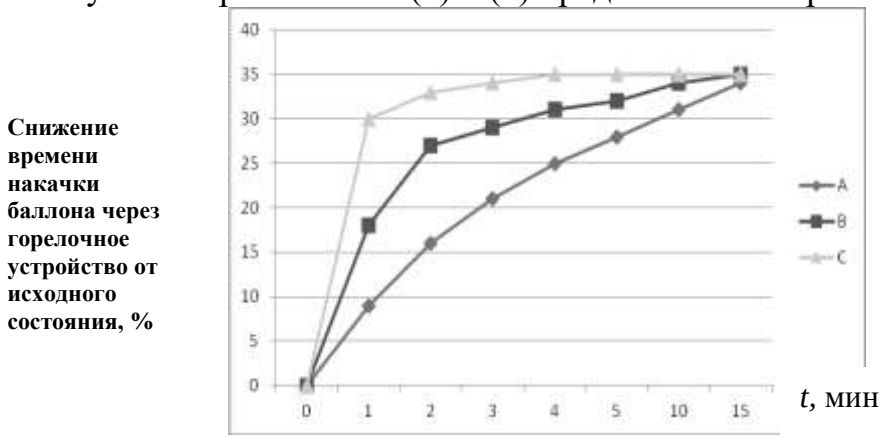
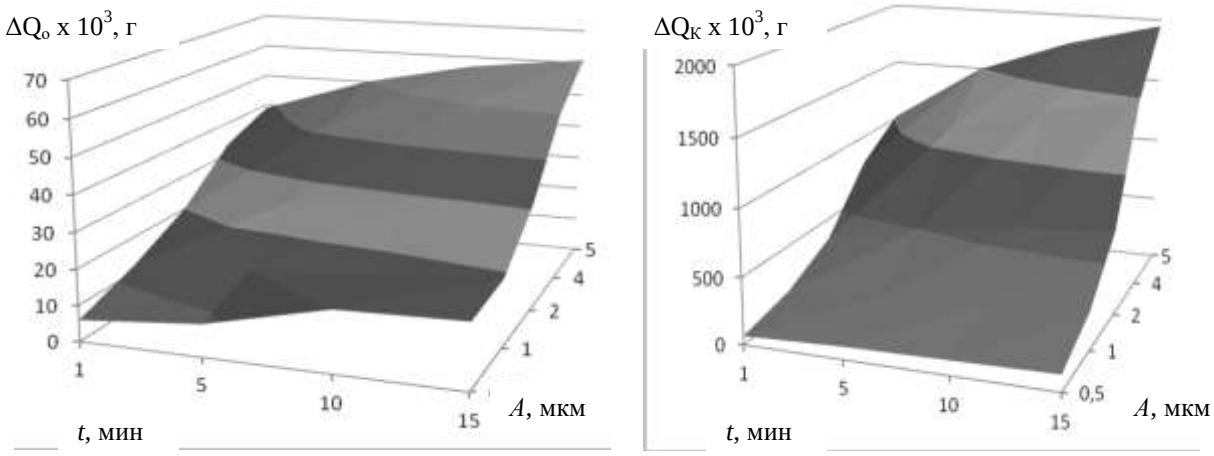


Рисунок 4. Исследование кинетики ультразвуковой обработки каналов различными методами А – общая очистка за счет кавитации в объеме жидкости (f = 22,4 кГц); В – обработка контактным методом при максимальной интенсивности кавитации (f = 22,5-23,0 кГц); С – обработка контактным методом при f = 21,0 кГц



а *б*

Рисунок 5. Зависимость изменения веса образца от схемы и режимов ультразвуковой обработки: объемная кавитация (а), контактное воздействие (б)

Видно, что при изменении схемы обработки сохраняется общий характер зависимостей, но при этом влияние амплитуды колебаний преобразователя существенно (на 62%) выше. Объяснить данный эффект можно исходя из изменившегося механизма разрушения поверхностного слоя. При объемной очистке «работает» кавитационный механизм воздействия ударных волн и мгновенных температур схлопывающихся микропузырьков на загрязнения, что приводит к скалыванию микрочастиц, проникновению жидкости в трещины и поры согласно эффекту Ребиндера и отслоению фрагментов. В «скрытых» зонах, несмотря на внешнюю интенсивность ультразвука, кавитация мало интенсивна, энергия пузырьков и их количество резко падают по мере удаления от входных кромок отверстий и каналов. Это приводит к снижению эффективности разрушения агломератов и слоев. При контактной схеме непосредственно поверхность изделия испытывает высокочастотные волновые деформации, что способствует возникновению внутренних напряжений и усталостных трещин прежде всего в твердых оксидных поверхностных слоях, механически и химически связанных с поверхностью каналов. В результате происходит резкое снижение адгезионно-когезионной прочности оксидной пленки и разрушение достаточно крупных ее фрагментов, сопровождающееся уже упомянутым выше эффектом Ребиндера и вымыванием последних потоком прокачиваемой жидкости. Таким образом, в единицу времени происходит удаление больших масс материала.

В четвертой главе представлена разработанная технология ультразвуковой обработки внутренних полостей и каналов горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам и разработаны предложения по созданию специального ультразвукового оборудования.

В ходе экспериментальных исследований по отработке комбинированной технологии определен рациональный диапазон частот

механических колебаний волновода по критериям максимального значения виброускорения и минимального уровня звукового давления (рис. 6).

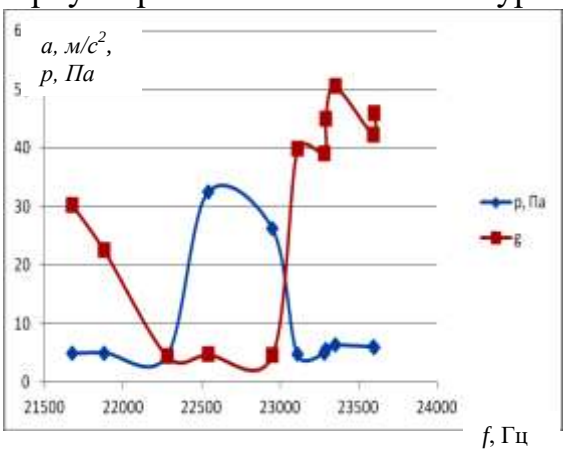


Рисунок 6. Изменение значений виброускорения *a* звукового давления *p* на расстоянии 0,5 м от ультразвуковой ванны в зависимости от частоты подаваемого на преобразователь напряжения (нагрузка 120 Н)

Видно, что наибольшие значения виброускорений соответствуют частоте около 23300 Гц. При этом кавитационные эффекты менее заметны, чем на частотах 22500-23000 Гц. В тоже время параметры звукового давления минимальны. В области частот кавитации наблюдается возрастание звукового давления почти в 3,5-4 раза. Фактические максимальные значения давления составляют 9-9,5 Па, что примерно соответствует значениям 100-105 дБ, являющимся предельно допустимыми в третьоктавных полосах при частотах 20-25 кГц.

На частоте порядка 21500 Гц наблюдается второй пик виброускорения при минимальном звуковом давлении. Аналогичные результаты получены при нагрузке 85 Н. Отличие состоит в смещении области высокого звукового давления в диапазон более высоких частот. Резкое снижение виброускорения в области частот, соответствующих интенсивной кавитации, может быть объяснено выходом систем «ультразвуковой преобразователь – изделие» из резонанса, что привело к уменьшению амплитуды колебаний последнего регистрируемой датчиком виброускорения. Таким образом, подтверждается целесообразность использования полученной при моделировании и теоретическом расчете частоты колебаний преобразователя 21-21,5 кГц. Этим же объясняется большая эффективность процесса обработки в некавитационном режиме (рис. 4).

Колебания общей активной накладке колебательной системы сообщаются пятью пьезокерамическими излучателями. С целью расширения номенклатуры изделий стакан выполнен волновой длины с отверстием, диаметр которого ступенчато уменьшается от выходного торца к входному с расположением ступени на расстоянии $1/2\lambda$ от выходного торца. Наружная поверхность стакана также ступенчатая с расположением ступени на расстоянии $1/4\lambda$ от выходного торца.

Рисунок 7. Акустические волны на поверхности жидкости над волноводом при рациональной интенсивности ультразвука

Такая конструкция обеспечивает высокую интенсивность колебаний, приводящую даже к образованию поверхностных волн (рис. 7). С целью снижения нагрузки на активную накладку объем жидкости рекомендуется таким, чтобы выходной торец накладки был покрыт слоем 10-15 мм. Это обеспечит постоянное кавитационное воздействие на газоотводящие трубки и центральное тело корпуса, погруженное в отверстие накладки.

В пятой главе описана опытная автоматизированная установка, спроектированная на основе выполненных исследований, и приведены результаты ее производственных испытаний и внедрения технологии.

Особенностью установки является применение автоматизированного цикла обработки по контролю текущего расхода технологической жидкости через горелочное устройство при помощи ультразвукового расходомера с микроконтроллером, обеспечивающем погрешность измерений не более 1%, шкафа для размещения ультразвуковой ванны на виброопорах с эффективной шумоизоляцией на основе базальтовых нитей, использование специальной активной накладки преобразователя в виде ступенчатого стакана волновой длины.

Производственная проверка технологии путем передачи обработанных комплектов горелочных устройств в эксплуатацию на компрессорные станции в г. Мокроус и г. Петровск (Саратовская область) показала, что достигнутое изменение проходного сечения отверстий и каналов позволяет довести частоту вращения турбины агрегата с 4500-4700 об/мин до 5050 об/мин при номинале 5000-5200 об/мин, т.е. войти в требуемый диапазон. КПД агрегата после очистки горелочных устройств возрос на 6%. Приведенная концентрация соединений NO_x и CO в сухих отработавших газах понизилась соответственно в 4,3 и 7,5 раза и соответствуют эталонному изделию.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате выполнения исследований по теме диссертации решена актуальная научно-практическая задача разработки ультразвуковой технологии и оборудования повышения пропускной способности горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам, имеющая важное значение для повышения эффективности магистральной транспортировки природного газа и импортозамещения в сфере эксплуатации компрессорных станций. При этом получены следующие новые результаты.

1. Обоснованы новая схема и технология ультразвуковой обработки полостей, каналов и отверстий, скрытых в корпусе изделия, заключающиеся в сообщении последнему колебаний на частоте, формирующей пучности деформаций в зонах наибольшей концентрации оксидных поверхностных слоев, при одновременном объемном воздействии ультразвуковой кавитации и прокачки технологической жидкости и обеспечивающие повышение производительности разрушения оксидного поверхностного слоя и удаления его частиц из «скрытых» зон до 10 раз по сравнению с объемной кавитацией.

2. Получены теоретические зависимости, позволяющие определить амплитуду колебаний ультразвукового преобразователя, обеспечивающую изгибные напряжения в конструкции изделия, превышающие адгезионную прочность оксидного слоя и обеспечивающие его эффективное отделение от нижележащего материала. Обоснованы технологические режимы ультразвуковой комбинированной обработки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам: частота ультразвука 21,0 – 21,5 кГц при выходном токе генератора 1,0-1,2 mA, расход технологической жидкости 1,4-1,5 $м^3$/ч, температура жидкости 40-55^{0}С, усилие прижатия изделия к торцу активной накладки ультразвукового преобразователя 80-120 Н, позволившие обеспечить пропускную способность изделий на 97-98% от эталонной.

3. Выполнено компьютерное моделирование форм собственных колебаний сборных тонкостенных конструкций сложной формы типа горелочных устройств и полей внутренних напряжений и деформаций, позволившее определить рациональную частоту вынуждающей силы, генерирующей распределение пучностей волновых деформаций, приводящих к трещинообразованию и отслоению оксидного слоя, в рабочей зоне. Для выбранного объекта диапазон частот составил 21,0 кГц.

4. Экспериментально путем макетирования обоснованы технические требования, по которым разработан и изготовлен опытный образец установки комбинированной ультразвуковой обработки горелочных устройств с автоматизацией цикла по контролю изменения расхода технологической жидкости через каналы при помощи ультразвуковых расходомеров повышенной точности.

5. Исследована кинетика изменения пропускной способности горелочных устройств при различных схемах обработки и доказана эффективность предложенной схемы с контактным воздействием на определенные зоны изделия. На основе сравнения уровня вибраций активной накладки, нагруженной очищаемым изделием, и интенсивности акустического шума с результатами изменения пропускной способности горелочного устройства установлен факт повышенной по сравнению с ультразвуковой очисткой эффективности данной схемы очистки при работе колебательной системы в некавитационном режиме.

6. В результате производственных испытаний и внедрения технологии и установки в РММ Петровского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Саратов» достигнуто изменение расхода жидкости через горелочные устройства от уровня с 0,75 до 1,25 $м^3$/ч, до уровня с 1,22 до 1,47 $м^3$/ч, что позволило довести частоту вращения турбины агрегата до 5050 об/мин при номинале 5000-5200 об/мин, т.е. войти в требуемый диапазон, и восстановить экологические показатели сгорания газовоздушной смеси до уровня эталонных изделий. Годовой экономический эффект из расчета на один комплект горелочных устройств составляет 162,7 тыс. руб.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Бекренев, Н.В. Исследование ультразвукового развертывания глубоких отверстий малого диаметра в деталях из труднообрабатываемых материалов / Н.В. Бекренев, Б.М. Бржозовский, А.М. Сарсенгалиев и др. // Технология машиностроения .-2014 .- № 1 .-С. 12-15.

2. Сарсенгалиев, А.М. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов / А.М. Сарсенгалиев, Н.В. Бекренев, М.В. Аврамов и др. // Наукоемкие технологии в машиностроения. -2016.- № 2. – С. 39-43.

3. Сарсенгалиев, А.М. Наукоемкая технология с использованием ультразвука при очистке труднодоступных поверхностей деталей сложной формы / А.М. Сарсенгалиев, Н.В. Бекренев // Наукоемкие технологии в машиностроении.-2017.- № 12 (78). – С. 29-35.

Патенты

4. Сарсенгалиев, А.М. Устройство для ультразвуковой обработки / А.М. Сарсенгалиев, Н.В. Бекренев, Б.М. Бржозовский, В.М. Фирсов. // патент RU № 2548344, опубл. 20.04.2015 г.

5. Сарсенгалиев, А.М. Способ ультразвуковой обработки и установка для его осуществления / А.М. Сарсенгалиев, Л.Н. Чернощеков, С.В. Пахтусов, А.П. Ковалев, С.Л. Выдыш, М.В. Аврамов, Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, В.Ю. Карачаровский // патент RU № 2625465, опубл. 14.07.2017 г.

Публикации в других изданиях

6. Сарсенгалиев, А.М. Технология и установка ультразвуковой очистки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам / А.М. Сарсенгалиев, Н.В. Бекренев, И.В. Злобина и др. // Восьмой Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций, 19-20 сент. 2013 г. – С. 242-244.

7. Сарсенгалиев, А.М. Оптимизация технологии и разработка установки комбинированной ультразвуковой очистки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам на основе компьютерного моделирования звуковых полей и полей напряжений / А.М. Сарсенгалиев, Н.В. Бекренев // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. -2013. -№ 13-1 (59). -С. 89-92.

8. Сарсенгалиев, А.М. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных устройств / Сарсенгалиев А.М., Бекренев Н.В. // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ.- 2014. - № 11 (70). -С. 6-12.

9. Сарсенгалиев, А.М. Исследование ультразвуковой очистки внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения контактным методом / А.М. Сарсенгалиев, И.В. Злобина, В.Ю. Карачаровский, Н.В. Бекренев // Вопросы электротехнологии.-2016. - № 1 (10). – С. 35-42.

10.Сарсенгалиев, А.М. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов в процессе ультразвуковой контактной очистки / А.М. Сарсенгалиев, И.В. Злобина, М.В. Аврамов, В.Ю. Карачаровский, Н.В. Бекренев // Информационно-коммуникационные технологии в науке, производстве, образовании (ICIT-2016), сб. материалов междунар. научно-техн. конф., СГТУ им. Гагарина Ю.А., ООО Издательство «Научная книга (Воронеж).- 2016.-С.38-42.

11.Sarsengaliev, Ay.M. Relaxation Residual Stresses by the Ultrasonic Vibrations / Sarsengaliev Ay.M., Lev A.V., Savran S.A., Smirnov O.O., Vereshchagin P.N. // SworldJornal, T.10, № j116(10), 2016.

12. Сарсенгалиев, А.М. Обоснование контактного метода ультразвуковой очистки труднодоступных внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения / А.М. Сарсенгалиев, И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // Вопросы электротехнологии.- 2017. - № 1 (15).- С. 48-53.

Сарсенгалиев Айдос Миргенгалиевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УДАЛЕНИЯ ОКСИДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ С ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ДЕТАЛЯХ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ СОЧЕТАНИЕМ КАВИТАЦИИ И КОНТАКТНОГО ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЯ

Автореферат

Подписано в печать Формат 60×84 1/16
Бум. офсет. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. 1,0
Тираж 100 экз. Заказ Бесплатно
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
410054, Саратов, Политехническая ул., 77
Отпечатано в Издательстве СГТУ: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Тел.: 24-95-70; 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru