

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи



Матвиенко Сергей Анатольевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВЕ
АКУСТИЧЕСКОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ
В КВАЗИУПРУГИХ СРЕДАХ**

05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк - 2016

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный

руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Лукичев Александр Владимирович

Официальные

оппоненты:

Хандожко Александр Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»,
заведующий кафедрой «Металлорежущие станки
и инструменты»;

Волков Игорь Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
ГОУ ВПО «Луганский государственный университет
им. В. Даля»,
доцент кафедры «Технология машиностроения и
инженерный консалтинг»

Ведущая

организация:

**ГОО ВПО Донецкий институт железнодорожного
транспорта**

Защита состоится « 15 » декабря 2016 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при Донецком национальном техническом университете по адресу: ауд. 6.202а, пр. Дзержинского, 1, г. Донецк, 283001.

Тел./факс: +38 062 3050104,

E-mail: tm@donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого национального технического университета по адресу: корпус 2, ул. Артёма, 58, г. Донецк, 283001

<http://donntu.org>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2016 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 01.014.02



Грубка Р.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях предъявляются высокие требования к долговечности и качеству машин. Качество машины определяется, в том числе и качеством поверхностного слоя (ПС) её деталей.

Одно из основных требований – обеспечение долговечности узлов трения, определяемой качеством рабочих поверхностей деталей пар трения. Надёжность агрегатов и механизмов машин определяется эксплуатационными свойствами (усталостной прочностью, коррозионной стойкостью, износостойкостью и др.) деталей узлов трения. В связи с этим актуальны научные разработки технологий, обеспечивающие качество ПС средне- и малогабаритных деталей пар трения, к рабочим поверхностям которых предъявляются высокие требования по прочности и износостойкости.

Одно из основных направлений развития технологии машиностроения – разработка и внедрение комбинированных технологий отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) на основе вибрационной обработки. Анализ современных технологий и оборудования для ОУО, технологических процессов изготовления ответственных деталей машин обуславливает потребность в разработке и исследовании новых высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, а также необходимость создания оборудования способного реализовать эти процессы. На сегодняшний день существует множество методов ОУО, и постоянно появляются новые, обладающие рядом собственных особенностей. Однако неизменной остается следующая задача: разработать наиболее эффективный метод ОУО, а также назначить режимы обработки, обеспечивающие требуемое качество ПС детали, максимальную производительность и (или) минимальную технологическую себестоимость в конкретных производственных условиях.

Исходя из этого, развитие теоретических основ и практическая реализация новой ресурсосберегающей технологии ОУО рабочих поверхностей деталей, является актуальной проблемой, которая имеет важное научно-техническое и практическое значение. Решение данной проблемы, создание нового технологического способа обработки и устройства для его осуществления, позволит повысить качество ПС изготавливаемых деталей и увеличить срок их службы, уменьшить энергозатраты, в сравнении с существующими способами ОУО, и тем самым обеспечить значительный экономический эффект.

Степень разработанности темы. Вопросам технологического обеспечения качества ПС деталей посвящены многочисленные работы Бабичева А.П., Безъязычного В.Ф., Братана С.М., Гусева В.В., Гурова Р.В., Горленко О.А., Иванова В.В., Ковалевского С.В., Крупени Е.Ю., Маталина А.А., Михайлова А.Н., Одинцова Л.Г., Рыжова Э.В., Сулова А.Г., Хандожко А.В., Улашкина А.П., Ящерицина П.И. и др.

Основное влияние на эксплуатационные свойства деталей (износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и др.) оказывают показатели качества ПС, в том числе макроотклонения, волнистость, шероховатость, физико-механические свойства.

Максимальная интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей наблюдается в процессе их приработки. Следовательно, рациональным является создание в процессе финишной обработки деталей качества поверхности приближен-

ного к качеству образуемому в процессе приработки.

В настоящее время, для обеспечения качества поверхности деталей пар трения, применяют различные отделочно-упрочняющие технологии. Широкое применение при выполнении финишных операций находят комбинированные методы вибрационной отделочно-упрочняющей обработки, характеризующиеся высокой производительностью и широкими технологическими возможностями. На сегодня, при усовершенствовании и разработке новых процессов вибрационной ОУО, недостаточно исследованы возможности применения в качестве рабочих сред технологических квазиупругих жидкостей, а также использования явления резонанса в звуковом диапазоне.

Современные требования к качеству деталей определяют необходимость усовершенствования технологий ОУО ответственных деталей машин, сориентированных на снижение ресурсозатрат на обработку и повышение её эффективности.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является разработка технологического обеспечения качества ПС рабочих поверхностей деталей узлов трения машин на основе создания нового ресурсосберегающего способа акустической ОУО в квазиупругой среде, позволяющего расширить возможности машиностроительной отрасли в направлении увеличения срока службы ответственных деталей машин.

Для достижения этой цели, необходимо решить **следующие задачи:**

1. На основе анализа современного состояния вопроса исследований определить состояние и пути совершенствования технологий обеспечения заданного качества ПС деталей пар трения.

2. Теоретически обосновать и исследовать новый способ вибрационной ОУО малогабаритных деталей, основанный на применении колебаний, приложенных от концентратора звуковой колебательной системы (ЗКС) непосредственно к детали, явлении резонанса и использовании в качестве технологической среды квазиупругой жидкости без абразивного наполнителя.

3. Разработать методику проектирования конструктивных параметров основных элементов ЗКС предлагаемой вибрационной установки, используемой для осуществления акустической ОУО в квазиупругой среде (АООКУС).

4. Исследовать влияние основных технологических параметров АООКУС на геометрические и физико-механические параметры ПС деталей.

5. На базе экспериментальных данных разработать регрессионные зависимости, устанавливающие связь между технологическими параметрами обработки и параметрами ПС, позволяющие технологически управлять качеством ПС.

6. Разработать технологические рекомендации для практического применения результатов исследований и сформулировать их технико-экономическое обоснование.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является технологический процесс АООКУС, а предметом – структура АООКУС, закономерности формирования качества ПС деталей.

Научная идея работы заключается в разработке теоретических основ новой вибрационной ОУО деталей в квазиупругих средах, обеспечивающей качество ПС, способствующее к увеличению срока службы деталей.

Научная новизна полученных результатов. В работе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленный на создание технологии АООКУС, обеспечивающей повышение общего ресурса обрабатываемых деталей. Научная новизна полученных результатов заключается в решении актуальной научно-технической задачи – создании способа АООКУС и выявлении его влияния на параметры качества обработанных поверхностей.

1. Впервые теоретически обоснован и практически реализован технологический способ ОУО, основанный на совместном использовании явления резонанса в звуковом частотном диапазоне и воздействии квазиупругой технологической среды на ПС деталей, что обеспечивает улучшение их эксплуатационных свойств.

2. Впервые исследовано технологическое обеспечение нового способа АООКУС и выявлены функциональные регрессионные зависимости между параметрами качества ПС и режимами обработки, что позволяет управлять процессом обработки.

3. Усовершенствована математическая модель для проектирования элементов установки для АООКУС, реализация которой позволяет увеличить как коэффициент усиления колебаний, так и их амплитуду, эта модель учитывает функциональное назначение обрабатываемых деталей.

Теоретическая значимость работы.

1. Установлена физическая сущность процессов, происходящих в ПС при осуществлении нового способа АООКУС, который основан на принудительном использовании явления резонанса, возникающего при приложении от концентратора ЗКС непосредственно детали вынужденных колебаний, совпадающих с собственной частотой колебаний детали и использовании в качестве технологической среды квазиупругой жидкости.

2. Разработанный способ АООКУС позволяет создать специальные принципиальные схемы и конструкции вибрационной установки и повысить производительность ОУО деталей.

3. Разработана математическая модель для проектирования элементов установки для АООКУС, а именно – цилиндрическо-профильного концентратора ЗКС, позволяющая обеспечивать максимальную амплитуду колебаний для деталей из разных материалов и различной конструкции.

4. Экспериментально впервые установлены регрессионные зависимости между параметрами качества ПС и режимами АООКУС, которые позволяют управлять процессом обработки, и добиваться заданных параметров ПС.

Практическая значимость работы.

1. Разработанное технологическое обеспечение АООКУС позволяет изменить основные характеристики ПС: микротвёрдость на 10-25%, параметры шероховатости на 15-30% для различных материалов, что обеспечивает увеличение срока службы деталей машин.

2. Разработанная методика проектирования элементов установки для АООКУС позволяет проектировать конкретные варианты установки для разных типов обрабатываемых деталей, что увеличивает как коэффициент усиления колебаний, так и их амплитуду.

3. Предложенные практические рекомендации позволяют проектировать новые технологические процессы с использованием в качестве финишной обработки

АООКУС.

4. Результаты работы внедрены на АТП АСЦ «Бытрадиотехника», а также в учебный процесс кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей» Донецкой академии автомобильного транспорта.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования проводились на основе научных положений технологии машиностроения, трибологии, теории планирования эксперимента и математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены с использованием лабораторной контрольно-измерительной аппаратуры, специально разработанного устройства и оснастки.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные научные разработки и положения:

- новый способ финишной ОУО – АООКУС;
- научное положение о том, что при акустической резонансной ОУО деталей в качестве рабочей (квазиупругой) среды можно использовать технологические жидкости,
- научное положение о том, что при воздействии квазиупругой жидкости на ПС колеблющейся в резонансном режиме детали происходит изменение основных параметров шероховатости и упрочнение поверхности .
- закономерности формирования качества ПС при АООКУС;
- методика и алгоритм синтеза установки для АООКУС;
- регрессионные зависимости, позволяющие управлять параметрами качества создаваемого ПС детали и режимами обработки.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность результатов подтверждается комплексными экспериментальными лабораторными исследованиями в условиях и на поверенном оборудовании лаборатории Донбасской государственной машиностроительной академии, выполненными согласно проведенному планированию эксперимента. Результаты работы получены с использованием современных стандартных аналитических методов и экспериментальных испытаний.

Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих конференциях в России, Украине и ДНР: межвузовская науч.-техн. конф. (НТК) «Енерго - та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (г. Донецк, 2011 г.); Межд. НТК «Инновационные направления развития технического сервиса машин» (г. Харьков, 2012 г.), Межд. НТК «Вібрації в техніці та технологіях» (г. Полтава, 2012 г.); Межд. НТК «Автомобільний транспорт: проблеми та перспективи» (г. Севастополь, 2012 г.), Межд. научно-практическая конференция (НПК) «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (г. Житомир, 2012 г.); Межд. НТК «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (г. Львов, 2012 г.); всеукраинская НТК «Системи автоматизованого проектування та комп'ютерного моделювання в технології машинобудування» (г. Львов, 2014 г.); Межд. НПК «Логістика промислових регіонів» (г. Донецк, 2013 г.); Межд. заочная НТК «Эксплуатация и развитие автомобильного транспорта» (г. Пенза, 2013 г.); Межд. форум молодежи «Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке» (г. Харьков, 2013 г.), Межд. НПК «Теоретичні та експериментальні дослідження

в технологиях современного материаловедения и машиностроения» (г. Луцк, 2013 г.), Межд. НПК «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (г. Таганрог, 2014г.); всеукраинская научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии в машиностроении» (г. Львов, 2014 г.); международная НТК «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2015 г.); 2 международная НПК «Научно-технические аспекты комплексного развития транспортной отрасли» (г. Донецк, 2016 г.); XV всероссийская НТК с международным участием «Механики XXI веку» (г. Братск, 2016 г.).

В полном объеме содержание диссертации излагалось на расширенных семинарах: кафедр «Технология машиностроения» Донбасской государственной машиностроительной академии (г. Краматорск); «Технической эксплуатации автомобилей» Донецкой академии автомобильного транспорта; «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета и XXII международной НТК «Машиностроение и техносфера XXI века» в 2015 г. в городе Севастополе.

Структура и объем работы. Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 150 наименований и приложения с методиками и актами внедрения результатов работы. Диссертация содержит 76 рисунков и 31 таблицу. Общий объем работы – 164 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и новизна тематики работы, сформулирована цель и задачи диссертации, определен объект и предмет исследований, описана научная и практическая ценность диссертационной работы.

В первом разделе «Анализ способов технологического обеспечения качества ПС рабочих поверхностей деталей машин» выполнен аналитический обзор по теме исследования, представлен анализ современного состояния отделочно-упрочняющих технологий.

Выполнен анализ влияния параметров качества поверхностного слоя на срок службы деталей машин. Проанализирована роль качества поверхности деталей в оценке их эксплуатационных свойств. Согласно современным представлениям, экс-

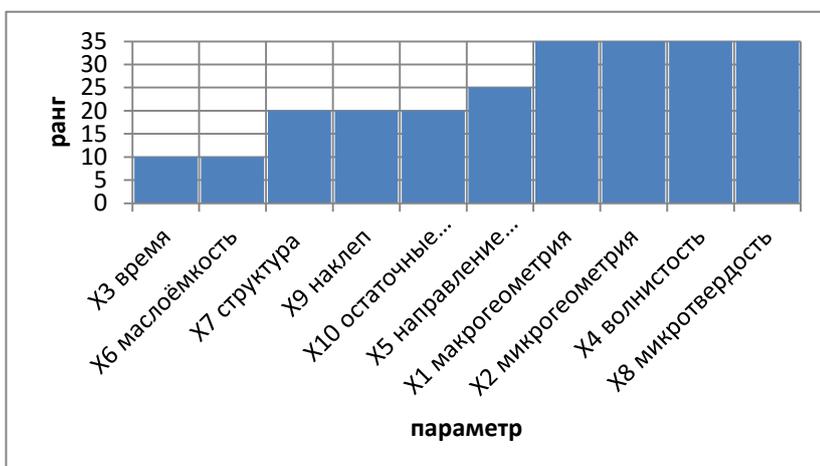


Рисунок 1. Средняя априорная диаграмма значимости параметров ПС в обеспечении износостойкости детали

плуатационные свойства деталей машин, такие как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость связаны с целым комплексом геометрических и физико-механических показателей состояния ПС (шероховатостью, волнистостью, макроотклонением, структурой, фазовым и химическим составом, микротвёрдостью, остаточными напряжениями). Влияние параметров ПС на срок службы деталей представлен на рисун-

ке 1. Выполнен детальный анализ применяемых технологических процессов для достижения качества рабочих поверхностей деталей и путей улучшения эксплуатационных характеристик деталей пар трения. Проведенный анализ традиционных способов ОУО, позволил сделать вывод о перспективности акустической вибрационной ОУО в обеспечении качества рабочих поверхностей деталей пар трения в целом и наиболее значимых, для обеспечения срока службы деталей, параметров ПС (микротвёрдость, микрогеометрия). Исходя из уровня вибрационных технологий обработки, определены направления для усовершенствования финишной обработки поверхностей трения деталей. На основании проведенного анализа современного состояния технологического обеспечения качества рабочих поверхностей деталей определена цель и сформулированы задачи диссертационного исследования. Составлена блок-схема работы.

Во втором разделе «Теоретическое исследование и моделирование АООКУС» изложено теоретическое обоснование способа АООКУС и разработана модель обеспечения качества ПС рабочих поверхностей деталей пар трения.

Сущность АООКУС состоит в придании детали, погруженной в квазиупругую среду, вынужденных резонансных колебаний звукового частотного диапазона.

АООКУС характеризуется следующими явлениями: динамическим воздействием технологической жидкости, выражаемое квазиупругой силой; механическим взаимодействием среды и материала детали в виде вязкого трения; старением (вибростабилизацией напряжений), кавитационными процессами.

Обязательным условием проведения обработки является реализация резонансного режима колебаний. На параметры обработки оказывают влияние следующие факторы: исходное состояние качества ПС, состав и вязкость рабочей среды, вид и размеры концентратора, форма и материал детали (рисунок 2).

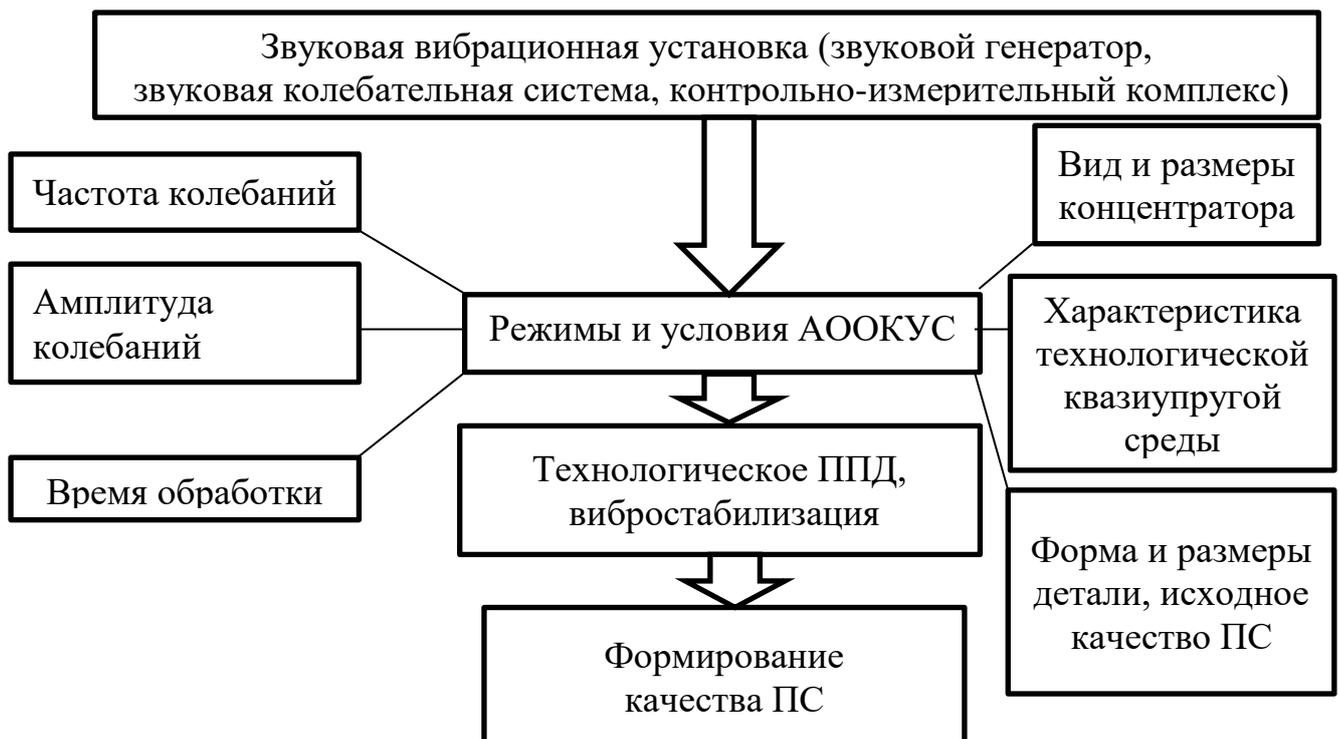


Рисунок 2. Структурная схема процесса АООКУС

Основными технологическими параметрами АООКУС являются: частота вынужденных колебаний; амплитуда колебательных смещений, зависящая от параметров ЗКС, в диапазоне от 30 мкм до 80 мкм; и длительность обработки, в интервале от 10 до 20 минут.

АООКУС основана на использовании нескольких физических явлений одновременно (рисунок 3), а именно: возникновение резонансных колебаний детали при предоставлении ей вынужденных колебаний, которые совпадают с собственной частотой колебаний в диапазоне звуковых частот (вторая или третья гармоники); взаимодействие ПС детали с квазиупругой средой, вызывающее эффект подобный ППД; физико-химических изменений в ПС в результате вибраций, которые сводятся к переориентации кристаллов, движению дислокаций к границам зерен.

В результате обработки происходит силовое взаимодействие ПС детали с окружающей квазиупругой средой, в результате которого изменяются параметры ПС, оказывающие основное влияние на эксплуатационные свойства деталей, которые и определяют ресурс деталей. Совокупность перечисленных воздействий формирует процесс технологической поверхностно-пластической деформации (ППД).



Рисунок 3. Модель формирования ПС при АООКУС

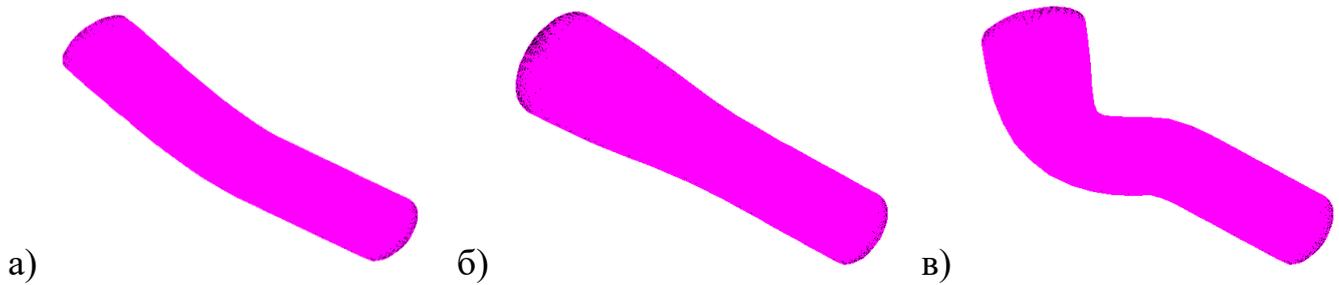
Формообразующие напряжения в ПС возникают под влиянием вязкого трения, квазиупругой силы и кавитационных процессов.

Таблица 1. Элементы структурной и функциональной связи АООКУС

Параметр	Наименование		Значение
Входные	Метод предварительной обработки	М	Точение, сверление, фрезерование, полирование, шлифование
	Качество ПС		Микротвёрдость, шероховатость, глубина упрочненного слоя
Внутренние	Вибрационная установка	ВУ	
	Материал размеры детали		
	Вид и размеры поверхности		
	Технологическая жидкость	ТЖ	Вязкость
	Техническая форма реализации процесса (режимы обработки)	РО	Частота
			Амплитуда
Принцип действия АООКУС		Вибростабилизация, ППД	
Выходные	Качество ПС		Микротвёрдость, шероховатость, глубина упрочненного слоя
	Долговечность		Срок службы
	Износостойкость		Износ
Внешние свойства метода	Способность изменять параметры ПС		
	Производительность		Число одновременно обрабатываемых деталей
	Ресурсоемкость		Трудоемкость, энергоемкость, материалоемкость. Размеры и стоимость, оборудования
	Степень экологической безопасности		Уровень производимого шума
Внешние условия	Условия функционирования		Температура ,влажность, квалификация рабочих, тип производства
Функции	Функция, связывающая входные параметры и процесс обработки $\Phi_{по}$		
	Функция, связывающая процесс обработки с выходными параметрами		

Исходя из диапазонов частоты 0,727-8000 кГц и амплитуды 30-80 мкм значения E_{y0} будут в пределах 300 кДж/м²мин.

Моделирование образца исследований было выполнено в САЕ – пакете COSMOS 2M ver 2.7. При расчёте напряжений в ПС принято, что значения сил инерции равномерно распределены по всему объему. Значение узловой нагрузки для механической модели с 9793 узлами равно 0,153 Н. Расчёт показал, что форма мод для первой и второй гармоники собственных колебаний представляет изгиб, а для третьей и четвертой кручение и сложный изгиб соответственно (рисунок 5).



а) б) в)
Рисунок 5. Формы колебаний модели при разных гармониках: а – первая (вторая); б – третья; в – четвертая.

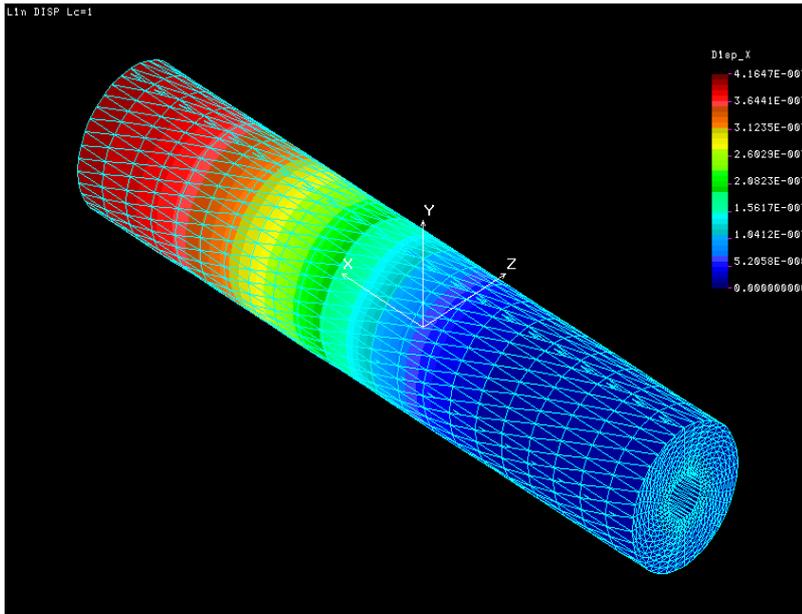


Рисунок 6. Статический расчет напряжений без сопротивления среды

Расчётным и экспериментальным методами установлено, что резонансную частоту колебаний деталей при обработке можно изменять за счет схемы базирования в звуковом частотном диапазоне 1,0...8,0 кГц. Расчет значений перемещений и напряжений для случая статического нагружения распределенной нагрузкой, численно равной силам инерции представлен на рисунке 6.

Из расчётов видно, что напряжения связаны с деформациями.

Из проведенного динамического расчета для случая

импульсного приложения нагрузки длительностью импульса $2,5 \cdot 10^{-6}$ с следует, что в обрабатываемых деталях возникают напряжения порядка 15-20 МПа.

Практические расчеты влияния квазиупругой среды на процесс колебаний выполнялись при помощи конечно элементного пакета ABAQUS 6.11 с заданной импульсной нагрузкой, распределенной по объему детали $0,059 \text{ Н/мм}^3$ и коэффициентом трения 0,015. Проведенные расчёты показали, что величины напряжений в ПС при взаимодействии с квазиупругой средой повышаются до 25-30 МПа.

Удельная величина микропластической деформации, обуславливающей микросглаживание микронеровностей за один энергоимпульс при мгновенном воздействии частиц технологической жидкости определяется выражением:

$$\delta = K_{Ra} K_{Sm} \sqrt{\frac{\mathcal{E}}{HV}} \quad (4)$$

где δ – удельная величина микродеформации за один энергоимпульс, мкм; K_{Ra} , K_{Sm} – коэффициенты, учитывающие геометрические размеры исходного микропрофиля обрабатываемой поверхности, \mathcal{E} – энергия взаимодействия частиц обрабатываемой среды с обрабатываемой поверхностью, Дж; HV – микротвёрдость обрабатываемой поверхности.

Таким образом, теоретически обоснована возможность осуществления

АООКУС и её влияния на качество поверхности.

В третьем разделе «Методика экспериментального исследования АООКУС» выбраны образцы для исследований, дано описание приборов, технологии, оборудования и общей методики проведения экспериментальных исследований АООКУС.

Для осуществления АООКУС была разработана акустическая вибрационная установка (рисунок 7) включающая: 1) генератор импульсов колебаний частот



звукового диапазона с мощностью 0,4 кВт, с импульсной мощностью 30 кВт; 2) ЗКС, 3) система регистрации и управления на базе ПК.

Преимуществом виброустановки перед другими типами установок является передача энергии непосредственно детали, обработка на резонансной частоте, использование квазиупругой технологической среды, концентрации энергии в обрабатываемых импульсах.

Рисунок 7. Общий вид акустической виброустановки

Основными элементами вибрационной установки является разработанный задающий звуковой генератор ЗГ 01 (рисунок 8, 9) с основными характеристиками: напряжение 65 В, частота 50 Гц, максимальная мощность 0,4 кВт, импульсная мощность от 1 до 30 кВт и ЗКС на базе пьезопреобразователя.

В этом разделе диссертации установлена взаимосвязь основных конструктивных и геометрических параметров концентратора звуковой колебательной системы и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) процесса обработки. Расчет акустического концентратора перемещений проводился с помощью программного комплекса ANSYS 13. Численный анализ заданных параметров концентратора показал, что при приближении к резонансной частоте компоненты перемещений, которые лежат в плоскости, перпендикулярной оси концентратора, стремятся к нулю, а компонента перемещений, параллельная оси симметрии концентратора, резко возрастает, что свидетельствует о переходе продольных колебаний в резонансный режим. Диапазон амплитуды колебаний узлов на исходном сечении концентратора для исследуемых образцов составляет от 20 до 100 мкм.

При увеличении диаметра цилиндрической части концентратора и его длины резонансная частота уменьшается (рисунок 10а). При фиксированных размерах цилиндрической части концентратора увеличение длины его профилированного участка приводит к резкому уменьшению резонансной частоты (рисунок 10б).

При этом коэффициент усиления колебаний остается неизменным.

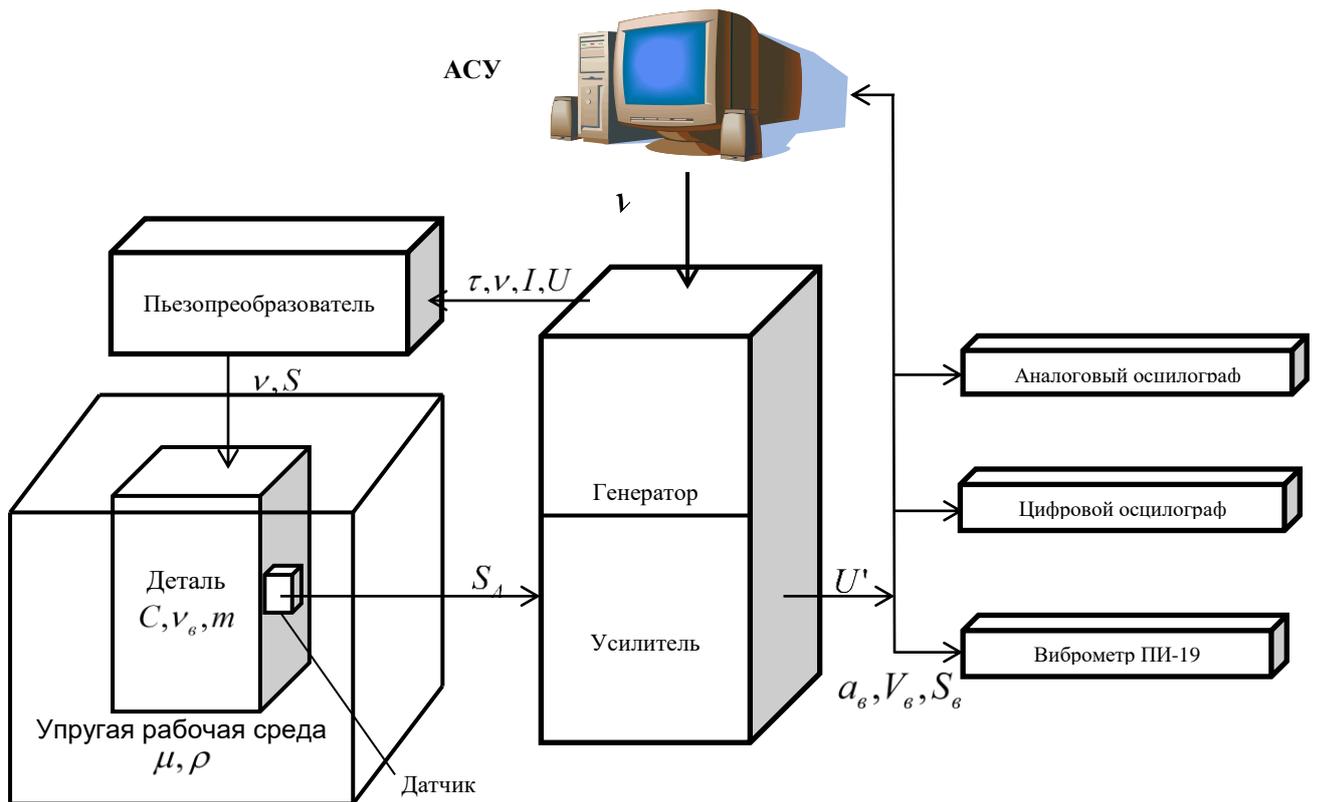


Рисунок 8. Схема виброустановки

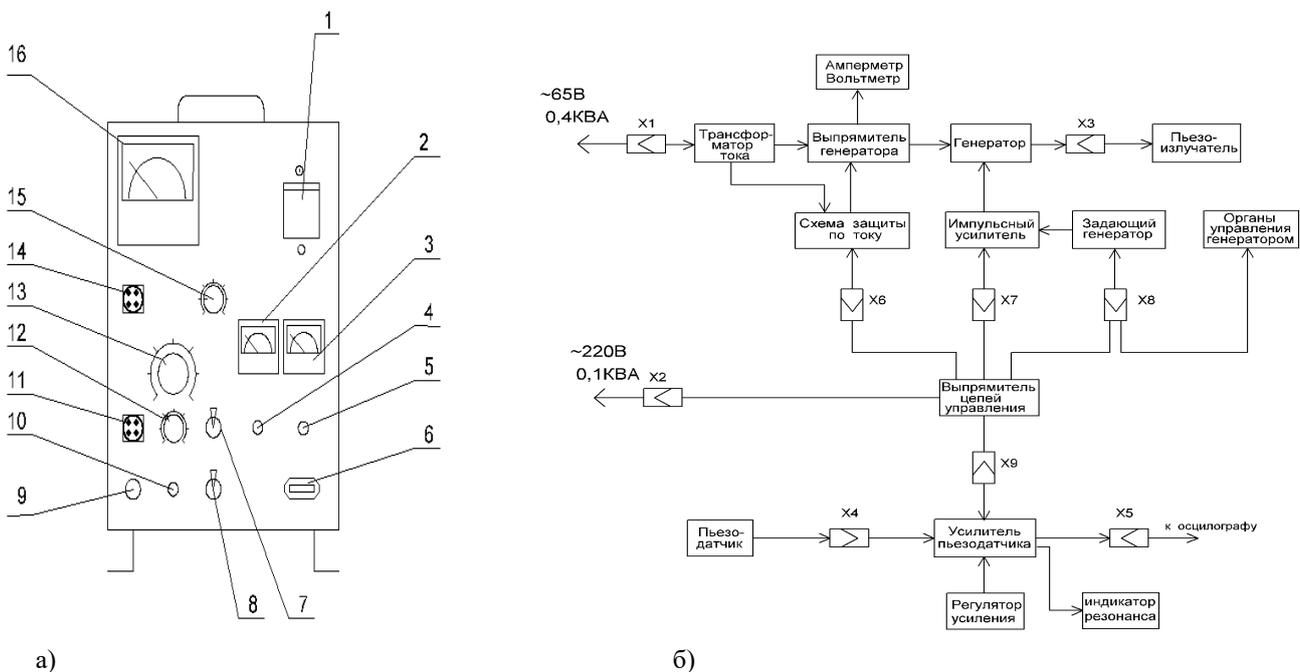


Рисунок 9. Схема панели управления (а) и структурная схема (б) ЗГ-01: где 1 - выключатель; 2 – вольтметр; 3 - амперметр; 4 - кнопка «Пуск»; 5 - кнопка «Стоп»; 6 - разъем; 7 - тумблер « Работа-контроль»; 8 - тумблер «Сеть»; 9 - предохранитель; 10 - лампа контроля; 11 - разъем; 12,13 – регулировка частоты; 14 - разъем; 15 - регулировщик «Чувствительность»; 16 - индикатор резонанса.

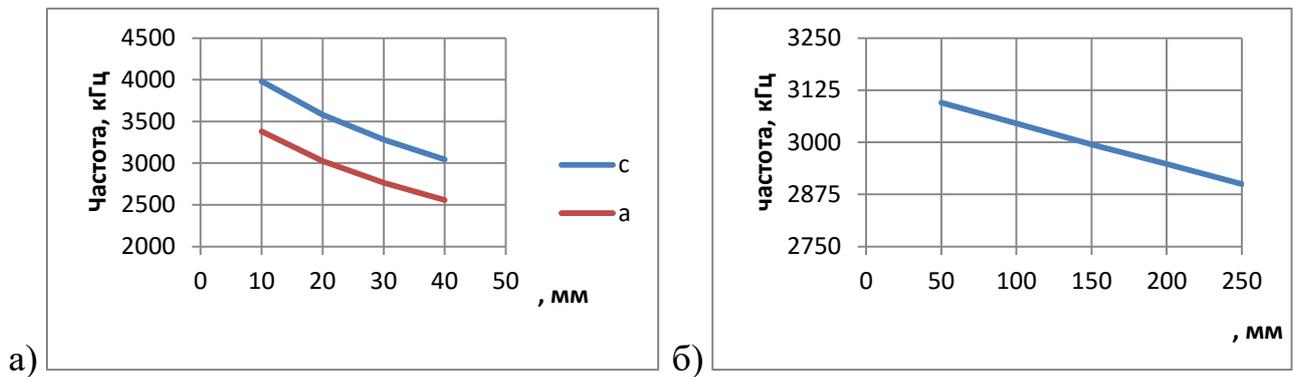


Рисунок 10. Зависимость резонансной частоты колебаний концентратора от: а) диаметра c и длины a ; б) длины b .

Спроектированная конструкция цилиндрическо-профилированного концентратора (рисунок 11) позволила довести коэффициент увеличения амплитуды перемещений от 4 (конусообразный) до 20.

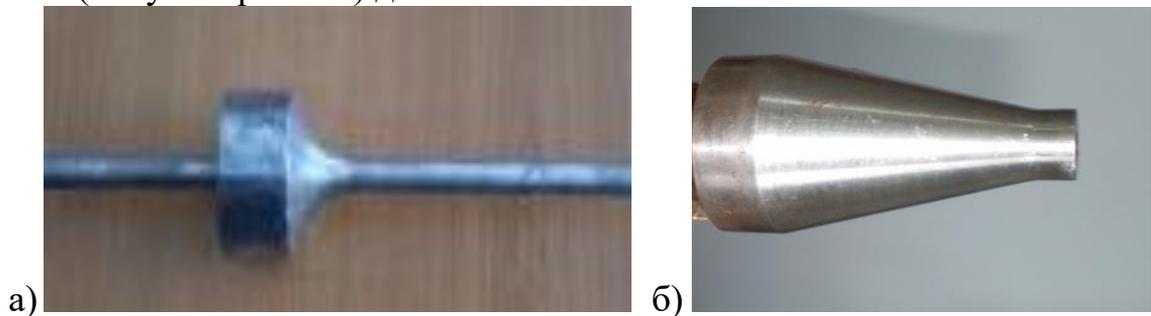


Рисунок 11. Концентратор: а) цилиндрическо-профилированный (№1), б) конусообразный (№2)



Рисунок 12. Образцы для исследований

Исследовалось влияние АОО-КУС на образцы разной формы и из разных материалов для исследования касательных и нормальных взаимодействий (напряжений) (рис.10). В качестве предварительной механической обработки использовалось точение, фрезерование, шлифование. В качестве технологических квазиупругих сред использовались масло И-40, вода, раствор ПАВ. Для исследования параметров шероховатости ПС образцов до и после обработки производилась запись профилограмм, снятых профилометром-профилографом TR-200.

Микротвердость поверхности образцов измерялась электронным твердомером ЭТМ-01. Визуальные наблюдения состояния обрабатываемой поверхности образцов осуществлялись на металлографическом микроскопе Метам Р-1, обеспечивающим

увеличение в 50 ... 507 раз. Диаметр и номинальные размеры образцов измерялись микрометром DSWQ0-100II с точностью 0,001 мм.

Таким образом, создана вибрационная установка, выбраны контрольно-измерительные приборы, разработана методика эксперимента для определения влияния АООКУС и его технологического обеспечения на качество ПС.

В четвертом разделе «Исследование влияния технологических параметров процесса АООКУС на геометрические и физико-механические параметры качества ПС» представлены результаты экспериментальных исследований АООКУС, основной задачей которых является определение закономерностей формирования качества ПС.

Для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на процесс обработки, был проведен отсеивающий эксперимент на основе плана Плакетта–Бермана (таблица 2).

Таблица 2. Уровни факторов отсеивающего эксперимента

Классификация фактора	Расшифровка фактора	Уровни варьирования		
		-1	0	+1
X ₁	Исходная микротвердость ПС	72 НВ	76 НВ	80НВ
X ₂	Исходная шероховатость ПС	0,8 мкм	1мкм	1,2 мкм
X ₃	Время обработки	5 минут	10минут	15 минут
X ₄	Способ предварительной обработки	точение	фрезерование	шлифование
X ₅	Амплитуда колебаний	40мкм	60мкм	80мкм
X ₆	Фиктивный фактор	-	-	-
X ₇	Тип концентратора	№1	№2	№3
X ₈	Объём ванны с рабочей средой	200мл	650мл	1000мл
X ₉	Химический состав технологической жидкости	И40	Н ₂ О	Н ₂ О + ПАВ
X ₁₀	Фиктивный фактор	-	-	-
X ₁₁	Частота колебаний	2,5 кГц	4 кГц	6,5 кГц

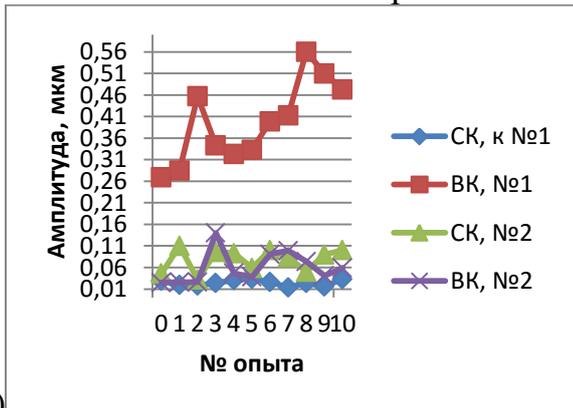
В результате расчетов были отсеяны малозначащие факторы. Для дальнейших исследований определены 3 фактора: время обработки, тип концентратора, состав технологической жидкости. Во время проведения эксперимента мы можем управлять временем обработки и составом технологической жидкости. Форма и размеры концентратора определяются исходя из материала и формы детали. Поэтому был спланирован и проведен двухфакторный эксперимент, факторы и их уровни представлены в таблице 3.

Исследования показали, что процесс формообразования ПС исследуемых образцов проходит при частоте колебаний в пределах 2,5-6,5 кГц и амплитуде от 20 до 100 мкм. Исходя из результатов эксперимента (рисунок 13 – 14), по определению влияния конструкции концентратора на АЧХ процесса, сделаны следующие выводы: наибольшая амплитуда колебаний наблюдается при резонансе; амплитуда зависит от формы концентратора и формы и материала образца; амплитуды собственных колебаний (СК) детали на разных концентраторах совпадают, а вынужденные колебания

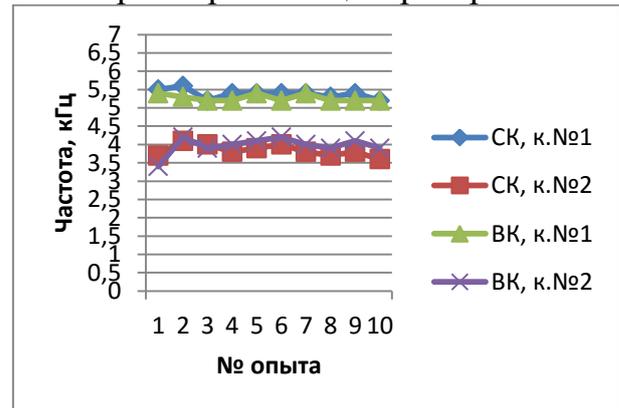
Таблица 3. Уровни факторов полного двухфакторного эксперимента

Наименование и обозначение факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	+1	
Время обработки- X_1 , мин	5	10	15	5
Состав технологической жидкости – X_2	№1	№2	№3	-

(ВК) различны. Экспериментально подтверждена адекватность используемого математического обеспечения расчета геометрических параметров концентратора.



а) Рисунок 13. Зависимость амплитуды СК и ВК от вида концентратора



б) Рисунок 14. Зависимость частоты СК и ВК от вида концентратора

АЧХ ЗКС при разных концентраторах различны (рисунок 15). АЧХ при разных значениях импульсов генератора совпадают по частотным значениям пиков, но отличаются по значениям амплитуды на пиках.

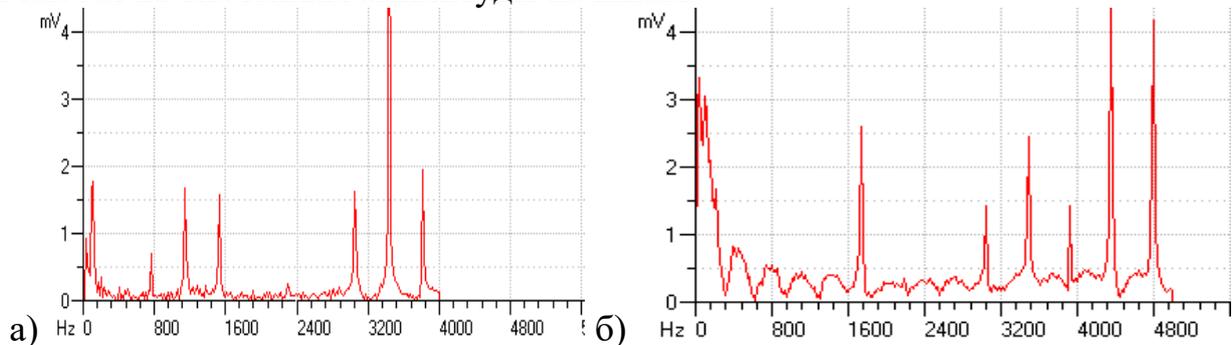
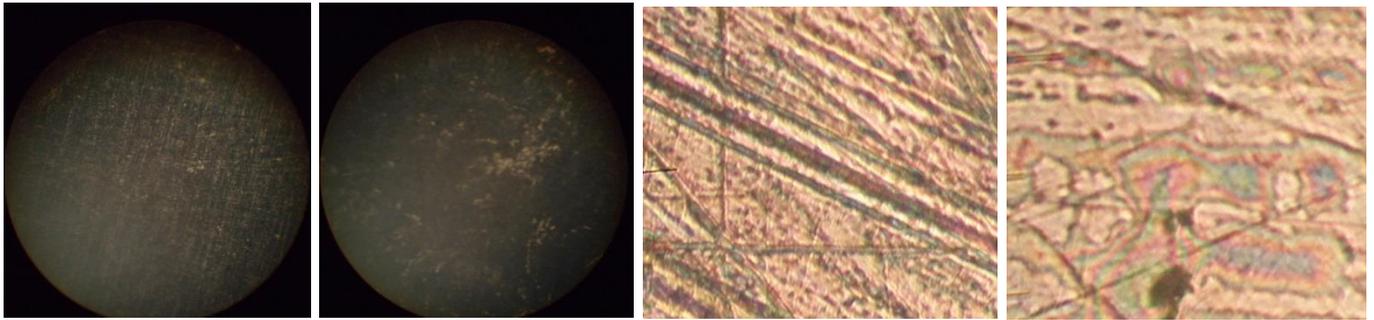


Рисунок 15. АЧХ колебаний системы с концентратором: а) цилиндрическо-профилированным; б) конусным.

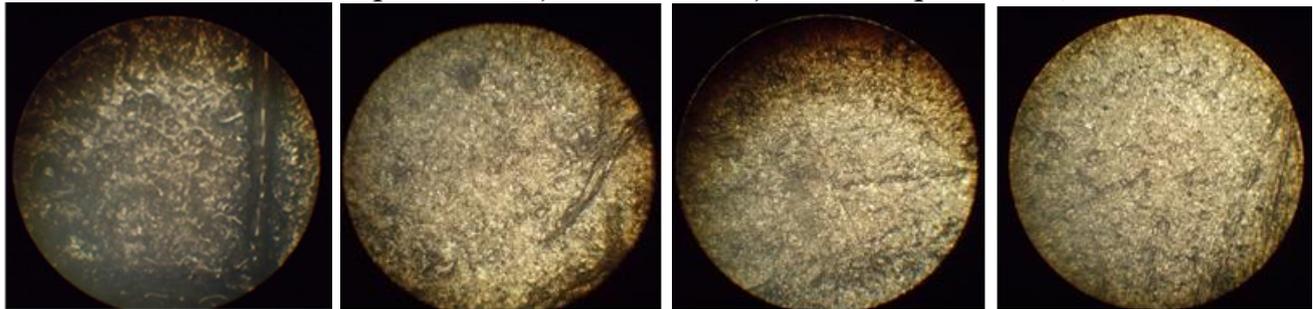
Получаемая в процессе АООКУС топография ПС (рисунок 16 – 17) обеспечивает в процессе эксплуатации: увеличение фактической площади контакта; минимальной удельной нагрузки на поверхность, вследствие увеличения t_p ; рациональную маслосъемкость поверхности, за счёт большого количества микровпадин с плавными краями, и, соответственно высокую износостойкость деталей.

После обработки пластин в индустриальном масле установлены изменения ПС пластин (таблица 4). Твердость ПС увеличилась от 72...76 НВ до 81...86 НВ.

По результатам исследования микротвердости образца из стали 40 с резонансной частотой $f=2500$ Гц построены графические зависимости (рисунок 18 – 19).



а) б) в) г)
Рисунок 16. Топография поверхности: стали 40Х, цементация: а-до обработки; б-после; АЛ8 после полирования: в) исходная; г) после обработки ($t=10$ мин)



а) б) в) г)
Рисунок 17. Топография поверхности АЛ10 (1:500): а) до обработки; б) 5 минут обработки; в) 10 минут обработки; г) 15 минут обработки.

Таблица 4. Твердость после обработки на резонансной частоте 3800 Гц, НВ

№		Время обработки на резонансной частоте, мин			
		0	5	10	15
1	Масло И40	74	78	82,5	86
2	Вода	74	76	79.5	82
3	Вода з ПАВ	74	78.25	82	81

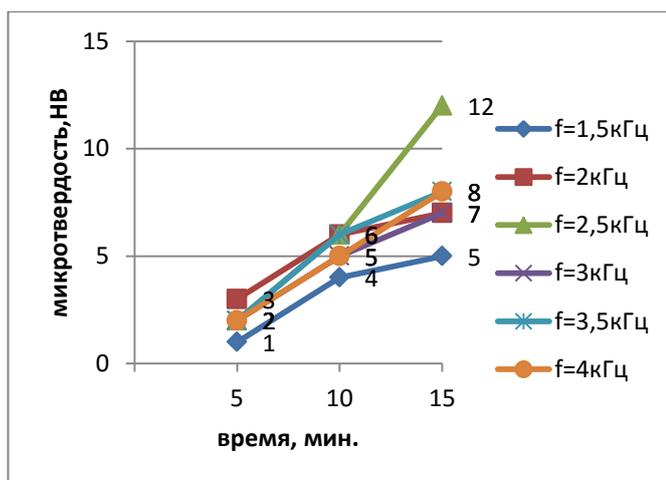


Рисунок 18. Зависимости увеличения микротвёрдости от времени

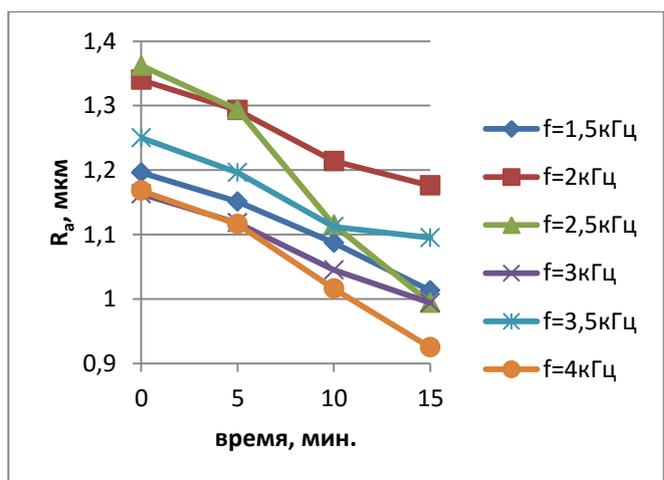


Рисунок 19. Зависимости шероховатости от времени обработки

О происходящих на уровне микронеровностей изменениях свидетельствуют кривые Аббота, полученные в результате обработки профилограмм, снятых с по-

верхности образцов до и после обработки (рисунок 20).

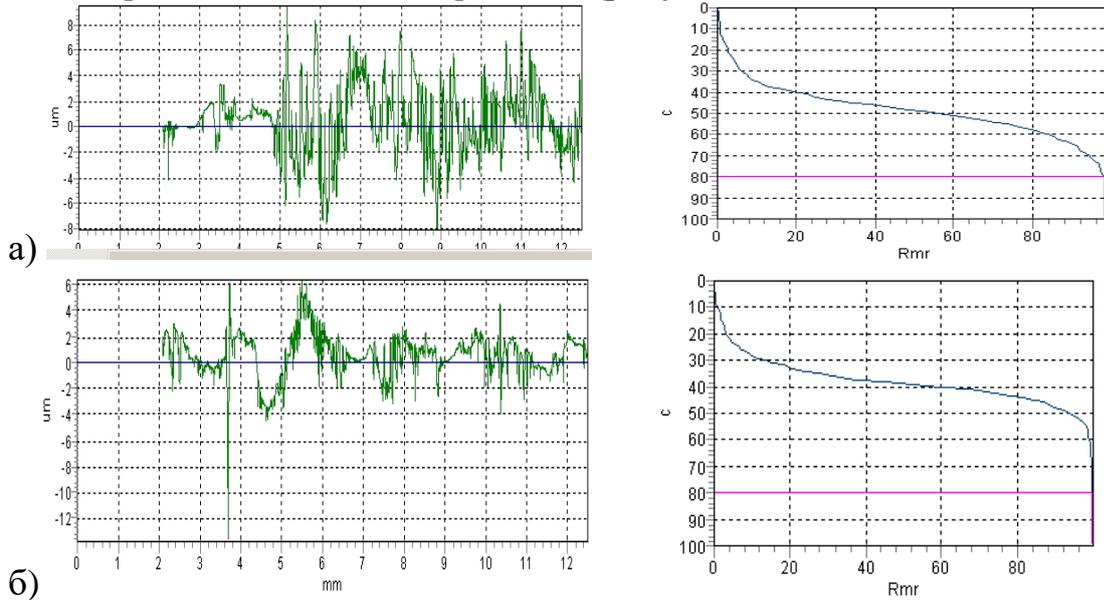


Рисунок 20. Микропрофиль и кривая Аббота до обработки - а, после обработки - б.

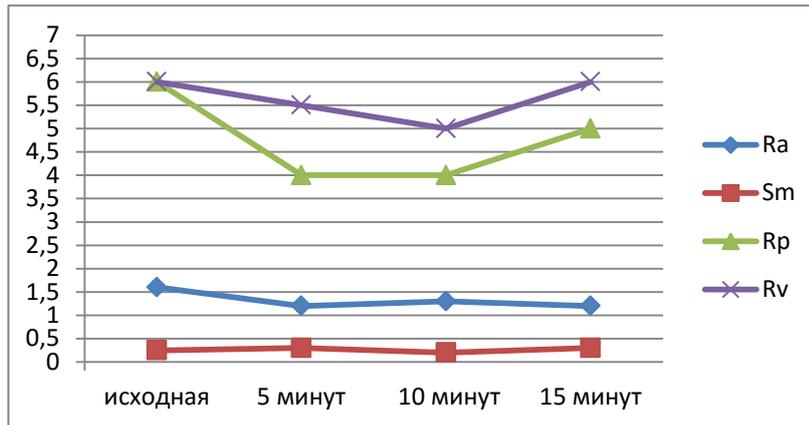


Рисунок 21. Зависимость параметров шероховатости от режимов обработки

Анализируя графики и профилограммы можно сделать вывод, что наиболее эффективное время обработки 10 мин. (рисунок 20–21).

С помощью регрессионного анализа были получены аналитические зависимости параметров ПС (среднее арифметическое отклонение профиля поверхности трения R_a , S_m – средний шаг неровностей, t_p – относительная опорная длина профиля) от исходных значений этих параметров и времени обработки. Таким образом, в результате регрессионного анализа получены формулы для нахождения основных параметров АООКУС на основе коэффициентов перекрытия и обработанности и определены области значений этих коэффициентов, позволяющие назначать режимы обработки, обеспечивающие рациональные значения параметров ПС.

Уравнение регрессии, описывающие зависимости параметров обработки от времени обработки имеют вид:

Уравнение регрессии, описывающие зависимости параметров обработки от времени обработки имеют вид:

- для пластины:

$$R_a = 0,776 * R_a^0 + 0,020 * t - 0,010 * R_a^0 * t \quad (5)$$

$$S_m = 0,827 * S_m^0 + 0,007 * t - 0,009 * S_m^0 * t - 0,00004 * S_m^0 * t^2 \quad (6)$$

$$R_v = 1,439 * R_v^0 + 0,101 * t - 0,086 * R_v^0 * t + 0,002 * R_v^0 * t^2 \quad (7)$$

- для цилиндрического образца:

$$R_a = 1,255 * R_a^0 - 0,042 * t + 0,004 * t^2 - 0,038 * R_a^0 * t \quad (8)$$

$$R_{sm} = 2,420 * R_{sm}^0 + 0,010 * t - 0,292 * R_{sm}^0 * t + 0,010 * R_{sm}^0 * t^2 \quad (9)$$

$$R_p = 1,152 * R_p^0 + 0,167 * t - 0,098 * R_p^0 * t + 0,003 * R_p^0 * t^2 \quad (10)$$

$$R_v = 1,994 * R_v^0 + 0,085 * t - 0,221 * R_v^0 * t + 0,009 * R_v^0 * t^2 \quad (11)$$

$$t_{p, 20\%} = 1,067 * t_{p, 20\%}^0 + 0,161 * t - 0,055 * t_{p, 20\%}^0 * t \quad (12)$$

$$t_{p, 50\%} = 2,145 * t_{p, 50\%}^0 + 0,976 * t - 0,182 * t_{p, 50\%}^0 * t + 0,005 * t_{p, 50\%}^0 * t^2 \quad (13)$$

Анализируя результаты экспериментальных исследований, можно сделать выводы, что применение АООКУС действительно приводит к повышению микротвердости ПС и оптимизации шероховатости поверхности деталей,

Разработанные регрессионные уравнения позволяют назначать режимы обработки исходя из исходной шероховатости. Адекватность формул была подтверждена сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований при разных технологических параметрах АООКУС (максимальная погрешность не превышает 15 %, коэффициент детерминации 0,9-0,95, квадратичная ошибка 8-10 %).

В пятом разделе «Практическая значимость результатов» рассмотрены перспективы применения АООКУС при ОУО, вибростабилизирующей, очистной обработке деталей, обработке инструмента, подготовке поверхностей к нанесению покрытий, при нанесении покрытий на поверхность. Экономический эффект от применения АООКУС обусловлен повышением износостойкости ПС, которое приводит к снижению энергозатрат при изготовлении и увеличению срока службы деталей, к продлению межремонтных сроков работы машин за счет повышения эксплуатационных свойств деталей пар трения, к уменьшению количества используемых деталей на протяжении всего срока службы машины, а следовательно к уменьшению использования материалов на изготовление запасных частей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача, состоящая в разработке новой ресурсосберегающей технологии обеспечения качества ПС деталей. Решена важная научно-практическая задача уменьшения ресурсозатрат при технологическом обеспечении качества ПС деталей за счет применения в качестве рабочей среды технологических жидкостей.

1. На эксплуатационные свойства деталей оказывают влияние параметры макроотклонений, волнистости, шероховатости и физико-механические свойства ПС. В процессе ОУО можно ограничиться воздействием на параметры шероховатости (R_a , S_m) и микротвердости. Наибольшие возможности по ресурсосбережению присущи вибрационной ОУО.

2. Разработанный способ АООКУС, являющийся комбинированным способом вибрационной обработки деталей, объединяет резонансный колебательный процесс детали и процесс её взаимодействия с технологической квазиупругой средой. При взаимодействии с квазиупругой средой в ПС возникают напряжения в пределах 25-30 МПа, что достаточно для протекания процесса пластической деформации. Обработка в звуковом частотном диапазоне обеспечивает достижение максимальной амплитуды колебаний, присущей низшим СК деталей.

3. Методика расчета геометрических размеров концентратора ЗКС позволяет

увеличить амплитуду колебаний детали в процессе обработки до 100 мкм, за счет увеличения коэффициента усиления колебаний до 20.

4. Разработана вибрационная установка для осуществления АООКУС, позволяющая использовать явление резонанса на низших СК деталей, уменьшить энергозатраты за счет применения высокой мощности возбуждающего импульса, резонанса и использования пьезоэффекта.

5. Установлены рациональные основные технологические параметры АООКУС. Основным технологическими параметрами АООКУС является время обработки (от 7 до 15 минут для исследуемых образцов), частота (от 2,5 до 4,5 кГц) и амплитуда (от 20 до 100 мкм) колебаний. На параметры обработки оказывают существенное влияние форма и размеры концентраторов, состав технологической среды. Выявлено, что проведение АООКУС детали позволяет повысить микротвердость поверхностного слоя для образца из Ст. 40 – на 7-10%; уменьшить R_a на 10-15%, увеличить S_m на 5-7%.

6. Разработаны регрессионные уравнения, раскрывающие зависимость параметров ПС от их исходного значения и времени обработки.

7. Разработанные технологические рекомендации позволили увеличить срок службы пальцев рессоры и кабины автомобиля DAF на 25-40%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Аналіз засобів підвищення якості деталей автомобілів енергозощаджувальною вібраційною обробкою (Аналіз способів підвищення якості деталей автомобілей енергосберегающою вібраційною обробкою) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О.П. Сакно, О.В. Лукічов // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвузівський наук.-техн. зб. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2011. – № 45. – С. 309 – 312. (*Класифікація способів підвищення якості поверхності деталей автомобілей*).

2. Аналіз причин недостатнього строка служби деталей підвіски вантажного автомобіля та методи його підвищення на прикладі пальця рессори (Аналіз недостатнього строка служби деталей підвески грузового автомобіля и методи его повышения на примере пальца рессоры) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О.Ю. Деньщиков, О.В. Лукічов // Вісник Севастопольського національного технічного університету. – 2012. – № 135. – С. 26 – 29. (*Аналіз умов експлуатації деталей підвески*).

3. Технологічне забезпечення зносостійкості поверхневого шару деталей автомобілів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі (Технологическое обеспечение износостойкости поверхностного слоя деталей автомобилей при финишной упрочняющей обработке в упругой среде) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О. В. Лукічов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. –2012. – № 122. – С. 122 - 127. (*Теоретическая модель упрочняющей обработки в упругой среде*).

4. Моделювання коливальних процесів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі (Моделирование колебательных процессов при финишной упрочняющей виброобработке в упругой среде) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О.Ю. Деньщиков, О.В. Лукічов // Галузеве машинобудування, бу-

дівництво: зб. наук. пр. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 2(32), т.1. – С. 93 – 99. (*Модель поведення деталі-представителя при вынужденных колебаниях*).

5. Ковалевський, С.В. Аналіз стану проблеми реновації деталей автомобілів технологічними методами (Анализ состояния проблемы реновации деталей автомобилей технологическими методами) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О. В. Лукічов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2012. – Вип. №3(62). – 2012. – С. 74 – 78. (*Технологическая схема вибрационной обработки*).

6. Повышение износостойкости деталей грузовых автомобилей технологическими методами: анализ и перспективы развития / С.А. Матвиенко, Е.И. Донченко, А.В. Лукичев, А.А. Писанец // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2012. – № 4. – С. 78 – 86. (*Классификация методов ОУО*).

7. Автоматизація управління установкою для здійснення процесу зміцнюючої вібраційної обробки в пружному середовищі (Автоматизация управления установкой для осуществления процесса упрочняющей обработки в упругой среде) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О.П. Сакно, О.В. Лукічов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. – № 746. – С. 128 – 131. (*Схема генератора звуковых колебаний*).

8. Метод звукової вібраційної обробки та його експериментальні дослідження (Метод звуковой вибрационной обработки и его экспериментальные исследования) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О.П. Сакно, О.В. Лукічов // Міжвузівський збірник. – 2013. – Вип. 37. – С. 177–182. (*Результаты исследований АООКУС*).

9. Зміна характеристик робочих поверхонь деталей при звуковій вібраційній обробці в пружному середовищі (Изменение характеристик рабочих поверхностей деталей при звуковой вибрационной обработке в упругой среде) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О.В. Лукічов, О.П. Сакно // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2013. – № 746. – С. 33–38. (*Результаты исследований по изменению параметров ПС при вибрационной обработке в квазиупругой среде*).

10. Забезпечення показників надійності деталей формуванням параметрів якості поверхні вібраційною обробкою (Обеспечение показателей надёжности деталей формированием параметров качества поверхности вибрационной обработкой) / **С.А. Матвієнко**, О.П. Сакно, О. В. Лукічов, О.В. Рейвах // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2014. – № 151. – С. 122–127. (*Метод повышения долговечности деталей ПС*).

11. Развитие ресурсосберегающих технологий финишной отделочно-упрочняющей обработки при изготовлении деталей машин / **С.А. Матвиенко**, А.В. Костенко, А.В. Лукичев, О.П. Сакно // Вестник Камчатского государственного технического университета – 2015. – № 34. – С. 19–23. (*Результаты изменения износостойкости до и после АООКУС*).

12. Михайлов, А.Н. Технологическое обеспечение звукорезонансной отделочной обработки в квазиупругой среде / А.Н. Михайлов, **С.А. Матвиенко**, А.В.Лукичев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – 2015. – Вып. 1(51) – С. 118–126. (*Установка для осуществления акустической отделочно-упрочняющей обработки деталей*)

Научные работы тезисы докладов в материалах конференций

13. **Матвієнко, С.А.** Аналіз засобів підвищення показників надійності деталей

автомобілів за рахунок використання зносостійких покриттів (Анализ повышения показателей надёжности деталей автомобилей за счёт использования износостойких покрытий) // Энерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: тези 2-ої міжвузівської науч.-техн. конф., 2–3 грудня 2010 р., Донецьк. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – С. 56. (*Классификация и анализ способов ОУО*).

14. Ковалевський, С.В. Особливості енергозберігаючих технологій зміцнення робочих поверхонь деталей автомобілів (Особенности энергосберегающих технологий упрочнения рабочих поверхностей деталей автомобилей) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко** // Логістика промислових регіонів: матеріали 3-ої Міжн. наук. практ. конф., 06-09 квітня 2011 р. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – С. 373–376. (*Анализ способов ОУО рабочих поверхностей деталей*).

15. **Матвієнко, С.А.** Розробка ресурсозберігаючої фінішної зміцнюючої вібраційно-резонансної обробки деталей (Разработка ресурсосберегающей финишной упрочняющей виброакустической обработки деталей) / **С.А. Матвиенко**, О.П. Сакно, О.В. Лукічов // Энерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: матеріали 3-ої міжвузівської науч.-техн. конф., 29–30 листопада 2011 р., Донецьк – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – С. 150–152. (*Теоритическая модель АООКУС*).

16. Ковалевський, С.В. Спосіб зміцнювальної вібраційної обробки в пружному середовищі та установка для його здійснення (Способ упрочняющей виброакустической обработки в упругой среде и установка для его осуществления) / С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко**, О.В. Лукічов // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: матеріали 3-ої Міжн. наук.-техн. конф., 2012 р., Львів – Львів: КІНПАТРИ ЛТД., 2012. – С. 72–73. (*Схема установки для осуществления АООКУС*).

17. Лукічов, О.В. Експериментальні дослідження методу звукової вібраційної обробки та управління його технологічними параметрами (Экспериментальные исследования метода звуковой виброакустической обработки и управление его технологическими параметрами) / О.В. Лукічов, С.В. Ковалевський, **С.А. Матвієнко** // Машиностроение и техносфера: сборник трудов 20-й Межд. научн.-техн. конф., Донецк. В 3 т. Т.2.: ДонНТУ, 2013. – С. 88–93. (*Зависимости параметров ПС от времени акустической обработки*).

18. Реновация деталей автомобиля технологическими методами в системе их технической эксплуатации / **С.А. Матвиенко**, А.В. Лукичев, О.П. Сакно, О.А. Энглези // Эксплуатация и развитие автомобильного транспорта: Проблемы автомобильно-дорожного комплекса России: материалы 10-й Межд. заочн. научн.-техн. конф., 2013 г., Пенза – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 119-126. (*Перспективы развития реновации деталей автомобилей*).

19. **Матвієнко, С.А.** Поліпшення трибологічних характеристик робочих поверхонь пар тертя вузлів автомобіля / **С.А. Матвієнко**, О.В. Лукічов, О.П. Сакно // Логістика промислових регіонів: матеріали 3-ої Міжн. наук.-практ. конф., 3-4 квітня 2013 р., Донецьк-Святогорськ – Донецьк, ЛАНДОН-XXI, 2013 – С. 204–207. (*Анализ способов улучшения качества поверхности деталей пар трения*).

20. **Матвиенко, С.А.**, Улучшение трибологических характеристик пар трения узлов автомобиля технологическими методами / **С.А. Матвиенко**, Н.Н. Рознаевич,

Лукичев А.В. // Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке: материалы 9-го Межд. форума молодежи, 2013, Харьков – Харьков, ХНТУСХ, 2013. – С. 98. (*Результаты обработки алюминиевого сплава АД0 в упругой среде*).

21. **Матвиенко, С.А.** Технологическое обеспечение износостойкости деталей за счет формирования параметров качества поверхности вибрационной отделочно-упрочняющей обработкой / **С.А. Матвиенко, А.В. Лукичев, О.П. Сакно** // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: материалы 15-ой Межд. научн.-практ. конф., 2014, Таганрог – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – С. 172-178. (*Технологическое обеспечение износостойкости деталей АООКУС*).

22. Обеспечение показателей надежности деталей при формировании параметров качества поверхности вибрационной обработкой / **С.А. Матвиенко, С.В. Ковалевский, А.В. Лукичев, О.П. Сакно** // Машиностроение и техносфера: сборник трудов по материалам 21-й Межд. научн.-техн. конф., 2014, Севастополь – Донецк: ДонНТУ, 2014. – С. 149–152. (*Теоретически исследован механизм формирования ПС при акустической вибрационной обработке в жидкой среде*).

23. Зміна характеристик робочих поверхонь деталей при звуковій вібраційній обробці в пружному середовищі (Изменение характеристик рабочих поверхностей при звуковой вибрационной обработке в упругой среде) / **С.В. Ковалевский, С.А. Матвиенко, О.В. Лукічов, О.П. Сакно** // Прогресивні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць 2-ої наук.-техн. конф., 2014, Львів – Львів, 2014. – С. –34-36. (*Зависимости параметров качества поверхности от режимов АООКУС*).

24. Михайлов, А.Н. Разработка способа акустической отделочно-упрочняющей обработки в квазиупругой среде / **А.Н. Михайлов, С.А. Матвиенко, В.А. Лукичев** // Механика XXI века: научное периодическое издание по материалам XV всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием, Братск – Братск: ФГБОУ ВО «БрГУ» 2016. – №15. – С. 138-142. (*Практическое применение АООКУС*)

Другие научные работы

25. Ковалевський, С.В. Спосіб вібраційної оздоблювальної обробки деталей у квазіпружному середовищі. (Способ вибрационной отделочной обработки в квазиупругой среде) / **С.В. Ковалевський, С.А. Матвиенко, К.В. Тулупова** // Патент України на корисну модель № 98504 U (Патент на полезную модель), В23Р 9/00. Дата подання заявки 05.12.2014, БИ №8 від 27.04.2015. – 2 с. (*Технологический процесс отделочной обработки рабочих поверхностей деталей в квазиупругой среде*)

26. Vibration sound processing in an elastic environment and a device for its implementation (Звуковая вибрационная обработка в упругой среде и установка для её реализации) / **S. Kovalevskyy, S. Matvienko, I. Starodubcev, O. Lukichov** // Research and Development in Mechanical Industry: 13th International conference, 12-15 september 2013., Kopaonik, Serbia – RaDMI., 2013. – P. 205–211. (*Схема вибрационной установки для реализации АООКУС*)

27. **Matvienko S.** Development of resource-saving technologies au of finishing strengthening processing during the machine parts manufacture (Развитие ресурсосберегающих технологий финишной отделочно упрочняющей обработки при изготовлении деталей машин) // International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies, SHEI. - Donetsk: Donetsk National Technical University. - №3, - 2016. - P. 27-32.

Подписано к печати 11.10.2016 г. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 0,9. Печать лазерная. Заказ № 658. Тираж 100 экз.

Отпечатано в цифровой типографии» (ФЛП Артамонов Д.А.)
Г. Донецк. Тел.: (050) 886-53-63

Свидетельство о регистрации ДНР серия АА02 №51150 от 9 февраля 2015 г.