

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОУВПО «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:

Мельникова Елена Павловна,
доктор технических наук, профессор,
Автомобильно-дорожный институт «ДонНТУ»,
заведующий кафедрой «Менеджмент организаций»;

Волков Игорь Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
Луганский государственный университет им. В. Даля,
доцент кафедры «Технология машиностроения и
инженерного консалтинга

Ведущая

организация:

Донецкий институт железнодорожного транспорта

Защита состоится «___» _____ 2016 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при Донецком национальном техническом университете по адресу: ауд. 6.202,а ул. Артёма, 58, г. Донецк, 283001.

Тел./факс: +380 62 3050104,

E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

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 базе вибрационной обработки.

Анализ современных технологий и оборудования для отделочно-упрочняющих операций технологических процессов изготовления ответственных деталей машин выдвигает потребность в разработке и исследовании новых высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, а также необходимость создания оборудования способного реализовать эти процессы.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам технологического обеспечения качества поверхности деталей посвящены 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 имеет место в процессе их приработки. Следовательно, рациональным является создание в процессе финишной обработки деталей качества поверхности приближенного к приработанному.

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. В настоящее время, при усовершенствовании и разработке новых процессов вибрационной ОУО, недостаточно исследованы возможности применения в качестве рабочих сред технологических квазиупругих жидкостей, а также использования резонансных колебаний звукового диапазона.

Современные требования к качеству деталей определяют необходимость усовершенствования технологий ОУО ответственных деталей машин, сориентирован-

ных на снижение ресурсозатрат на обработку и повышение её эффективности.

Связь работы с научными программами и темами. Материалы диссертации являются обобщением исследований, выполненных в рамках комплексной целевой программы: «Стратегия экономического и социального развития Донецкой области на период до 2015 года» (Постановление Кабинета Министров Украины от 21.07.2006 г., № 1001). Результаты исследований использованы при выполнении НИР на кафедре «Технология машиностроения» в Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) в рамках государственной научно-исследовательской темы: «Разработка и исследование специальных методов обработки деталей машин тяжелого машиностроения» (№ государственной регистрации 0109У007792 Дк-04-2012).

Цель исследования. Разработка технологического обеспечения качества ПС рабочих поверхностей деталей узлов трения машин на основе создания нового ресурсосберегающего способа акустической ОУО в квазиупругой среде для повышения долговечности деталей.

Для достижения этой цели, в работе 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, явления 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 выполнить их технико-экономическое обоснование.

Объект исследования – технологический процесс АООКУС.

Предмет исследования – структура АООКУС, закономерности формирования качества ПС деталей.

Научная новизна исследования 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 её 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, учитывающая функциональное назначение обрабатываемых деталей.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработан новый способ вибрационной ОУО малогабаритных деталей, основанный на применении резонансных колебаний, приложенных от концентратора ЗКС непосредственно детали, и использовании в качестве технологической среды квазиупругой жидкости. Применение нового способа АООКУС позволяет разработать конструкцию вибрационной установки и повысить производительность ОУО деталей.

2. Разработана методика расчета геометрических параметров цилиндрическо-профильного концентратора ЗКС, позволяющая обеспечивать максимальную амплитуду колебаний для деталей из разных материалов и формы.

3. Экспериментально впервые установлено, что использование предлагаемых способа и устройств позволяет изменить основные характеристики ПС: микротвёрдость на 10-25%, параметры шероховатости на 15-30% для различных материалов.

4. Результаты работы внедрены на АТП АСЦ «Бытрадиотехника», а также в учебном процессе 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.

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований создан способ АООКУС и установка для его реализации.

2. Установлены закономерности формирования ПС при АООКУС.

3. Результаты исследования влияния АООКУС и её технологических режимов на геометрические и физико-механические показатели ПС деталей.

Личный вклад соискателя. Основные результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены соискателем лично. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат результаты, отмеченные в списке литературы по материалам диссертации.

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, проведенными согласно проведенному планированию эксперимента. Результаты работы получены с использованием современных стандартных аналитических методов и эксперимен-

тальных испытаний.

Основные научные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обговаривались на 14 научных конференциях и 3 научных семинарах: межвузовская научно-техническая конференция (НТК) «Енерго - та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (г. Донецк, Украина, 2011 г.), международная НТК «Инновационные направления развития технического сервиса машин» (г. Харьков, Украина, 2012 г.), международная НТК «Вібрації в техніці та технологіях» (г. Полтава, Украина, 2012 г.), международная НТК «Автомобільний транспорт: проблеми та перспективи» (г. Севастополь, Россия, 2012 г.), международная научно-практическая конференция (НПК) «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (г. Житомир, Украина, 2012 г.); международная НТК «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (г. Львов, Украина, 2012 г.); всеукраинская НТК «Системи автоматизованого проектування та комп'ютерного моделювання в технології машинобудування» (г. Львов, Украина, 2014 г.); международная НПК «Логістика промислових регіонів» (г. Донецк, Украина, 2013 г.); международная заочная НТК «Эксплуатация и развитие автомобильного транспорта» (г. Пенза, Россия, 2013 г.), международный форум молодежи «Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке» (г. Харьков, Украина, 2013 г.), международная НПК «Теоретичні та експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства і машинобудування» (г. Луцк, Украина, 2013 г.), международная НТК «Машиностроение и техносфера XXI век» (г. Севастополь, 2013, 2015 г.г.), международная НПК «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (г. Таганрог, ЮФУ, 2014г.); всеукраинская научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии в машиностроении» (г. Львов, 2014 г.); научные семинары в ДГМА (г. Краматорск, 2014 г.), ДААТ (г. Донецк, 2016 г.) и ДонНТУ (г. Донецк 2016 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на: расширенных семинарах кафедры «Технической эксплуатации автомобилей» Донецкой академии автомобильного транспорта и кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета; XXII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в 2015 г. в городе Севастополе.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 25 научных работ, из них 12 статей в специализированных изданиях, утвержденных ВАК; 1 статья в европейском издании, имеющем соответствующую индексацию; 11 статей на международных научно-технических конференциях; 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, перечня использованных источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 162 страницы, из которых 135 страниц основной части, 10 рисунков, 14 таблиц, 150 литературных источников на 12 страницах и 5 приложений на 15 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования; определены направления исследования; сформулированы цель, научная новизна,

практическая ценность и задачи исследования; изложены положения, выносимые автором на защиту; приведены данные об апробации работы и публикациях; указаны сведения о структуре и объёме диссертации.

В первом разделе «Анализ способов ОУО, их технологического обеспечения и влияние на качество поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей машин» выполнен аналитический обзор по теме исследования, представлен анализ современного состояния отделочно-упрочняющих технологий.

Выполнен детальный анализ путей улучшения эксплуатационных характеристик деталей пар трения. Проанализирована роль качества поверхности деталей в оценке их эксплуатационных свойств. Согласно современным представлениям, экс-

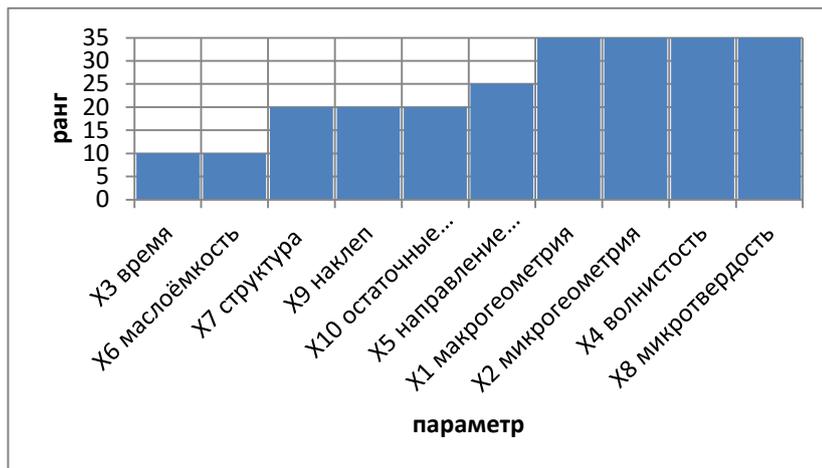


Рисунок 1. Средняя априорная диаграмма значимости параметров ПС в обеспечении износостойкости детали

плуатационные свойства деталей машин, такие как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость взаимосвязаны с целым комплексом геометрических и физико-механическими показателями состояния ПС (шероховатостью, волнистостью, макротклонением, структурой, фазовым и химическим составом, микротвёрдостью, остаточными напряжениями). На базе психологического эксперимента составлена средняя априорная диаграмма значимости параметров ПС в определении износостойкости детали (рис. 1). Выполненный анализ традиционных способов ОУО, позволил сделать вывод о перспективности акустической вибрационной ОУО в обеспечении качества рабочих поверхностей деталей пар трения и их наиболее значимых параметров: микротвёрдости и микрогеометрии. Исходя из уровня технологий ОУО, определены направления усовершенствования способов ОУО. На основании проведенного анализа современного состояния технологического обеспечения качества поверхности деталей определена цель и сформулированы задачи диссертационного исследования.

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

Основными технологическими параметрами АООКУС являются: 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 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.

Основными параметрами АООКУС являются частота и амплитуда колебаний, длительность обработки (рис. 2). 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.

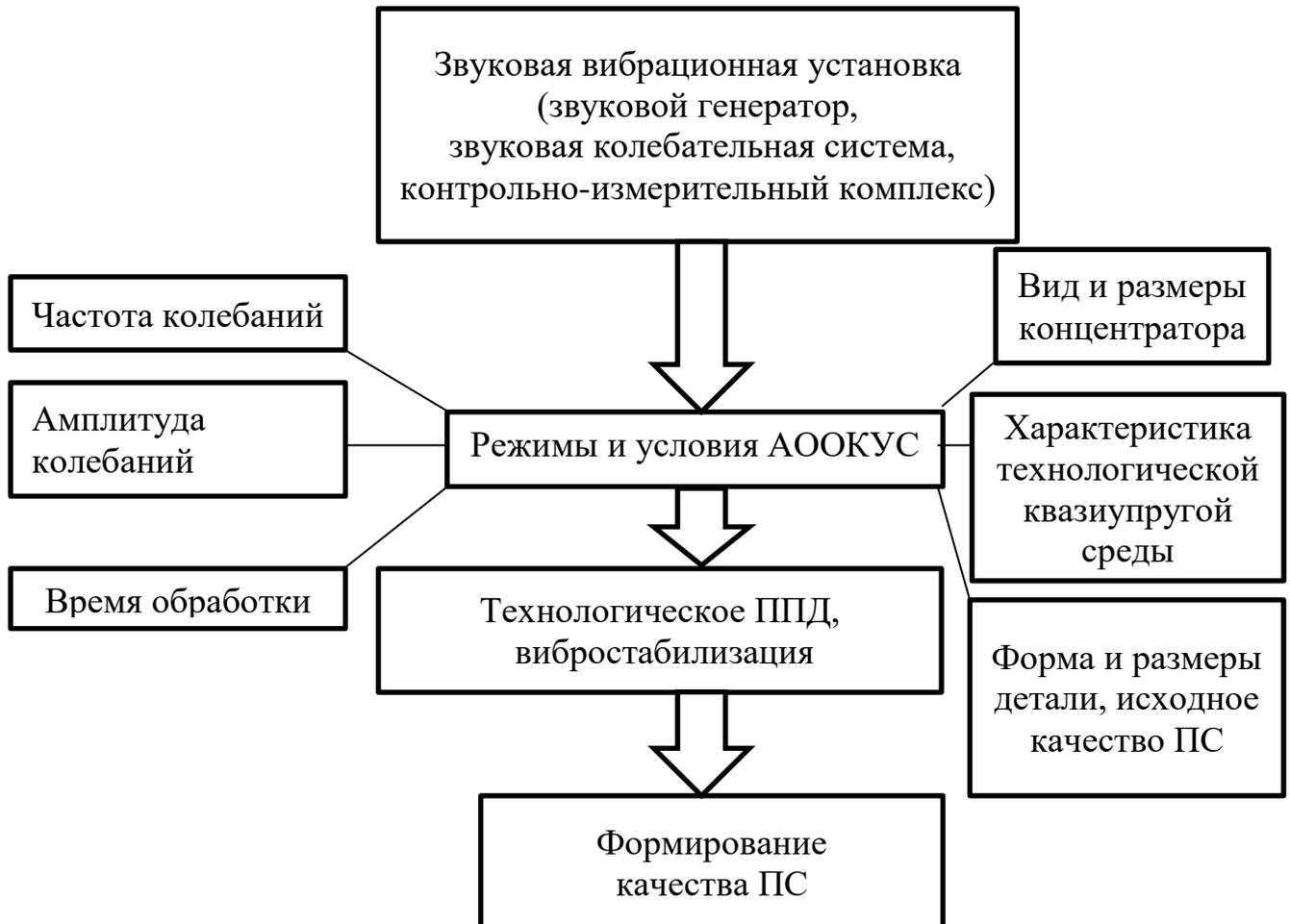


Рисунок 2. Структурная схема процесса АООКУС

АООКУС основана на использовании нескольких физических явлений одновременно (рис. 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, которое вызывает эффект подобный ППД; физико-химических изменений в ПС в результате вибраций, которые сводятся к переориентации кристаллов, движению дислокаций к границам зерен.

АООКУС заключается в придании детали вынужденных колебаний в звуковом частотном диапазоне, вызывающих резонанс. В результате 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. Сила, действующая на тело, совершающее вынужденные колебания в квазиупругой среде:

$$\begin{aligned}
 F &= F_{mp} + F_{кв}, \\
 F_{mp} &= -k_1 V, \\
 F_{кв} &= -k_2 A,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где k_1 – коэффициент сопротивления среды, зависит от вязкости среды η и площади соприкасающихся поверхностей S : $k \sim \eta S$; V – скорость заготовки; k_2 – коэффициент квазиупругой силы; A – амплитуда.

Целью АООКУС является достижение требуемого качества и эксплуатационных свойств ПС с минимальной себестоимостью и временем обработки. Функционирование системы ОУО проявляется в детерминированной связи через процесс обработки между входными и выходными параметрами.

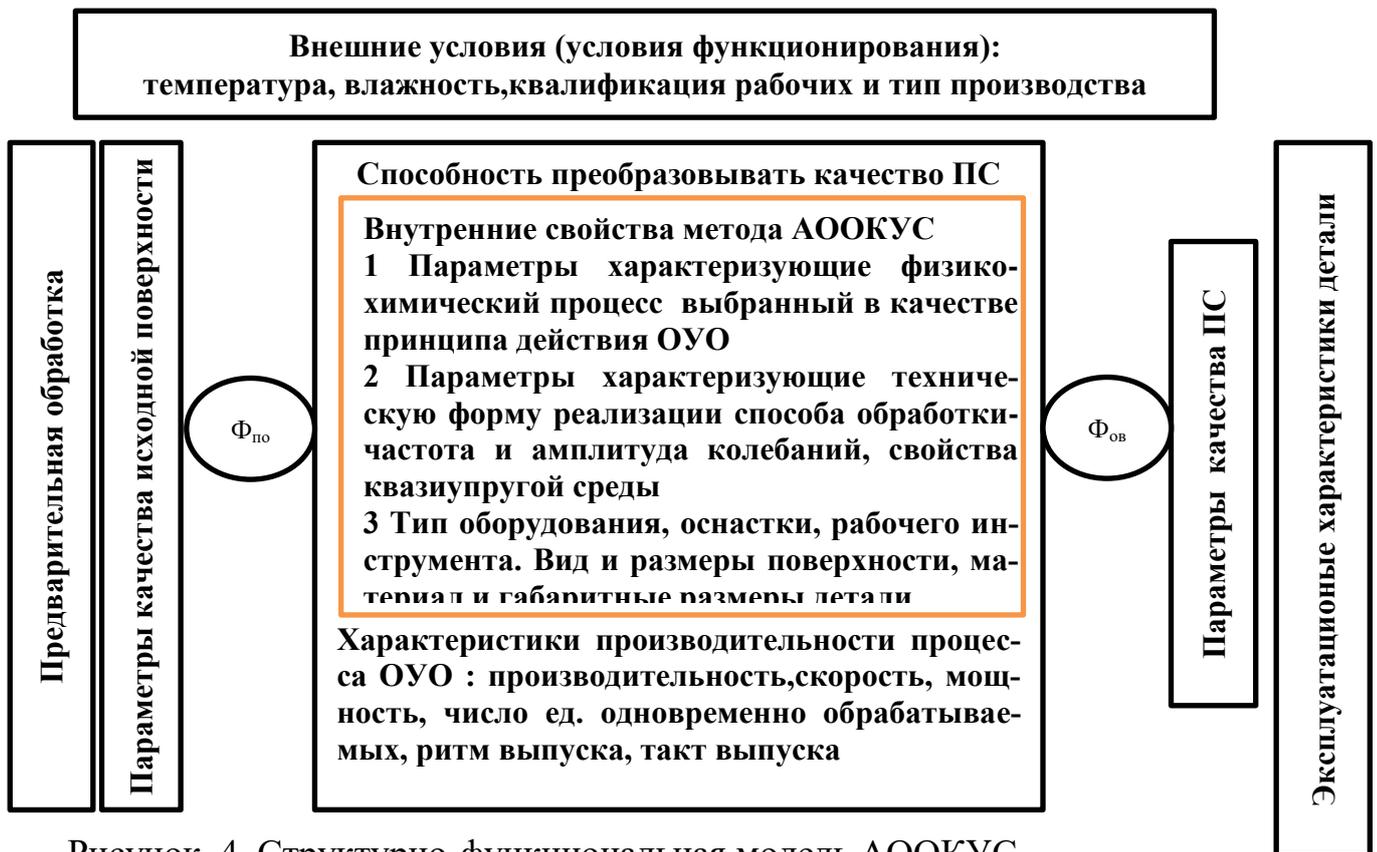


Рисунок 4. Структурно-функциональная модель АООКУС

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 и габаритные размеры детали		
	Вид и размеры поверхности		
	Технологическая жидкость	ТЖ	Вязкость
	Техническая форма реализации процесса (режимы обработки)	РО	Частота
			Амплитуда
Принцип действия АООКУС		Вибростабилизация, технологическое ППД	
Выходные	Качество ПС		Микротвёрдость, шероховатость, глубина упрочненного слоя
	Долговечность		Срок службы
	Износостойкость		Износ
Внешние	Способность изменять параметры ПС		

	Производительность	Производительность, ритм выпуска, число одновременно обрабатываемых деталей
	Ресурсоемкость	Трудоемкость, энергоемкость, материалоемкость. Размеры и стоимость, оборудования
	Степень экологической безопасности	Уровень производимого шума,
Внеш- ние условия	Условия функционирования	Температура ,влажность, квалификация рабочих, тип производства
	Функ- ции	Функция связывающая входные параметры и процесс обработки $\Phi_{по}$ Функция связывающая процесс обработки с выходными параметрами

Эффективность обработки может выражаться через показатели улучшения и экономические показатели(целевые функции):

$$\begin{aligned} HV &= F_1(A t) - \max \\ Ra &= F_2(A t) - \text{равновесное} \\ \text{Себестоимость} & - \min \end{aligned} \quad (2)$$

Энергетический параметр деформации верхнего слоя металла, для АОО-КУС будет иметь следующий вид:

$$E_{уд} = K A f^{60/2000}, \text{кДж/м}^2 \text{мин} \quad (3)$$

где: K - коэффициент, учитывающий неравномерность энергетического воздействия, зависящего от размеров детали и положения обрабатываемых поверхностей относительно направления вибраций; f - частота колебаний, Гц; A - амплитуда колебаний.м.

Исходя из диапазонов частоты 0,727-8000 кГц и амплитуды 50-80 мкм значения $E_{уд}$ 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 (рис. 5).

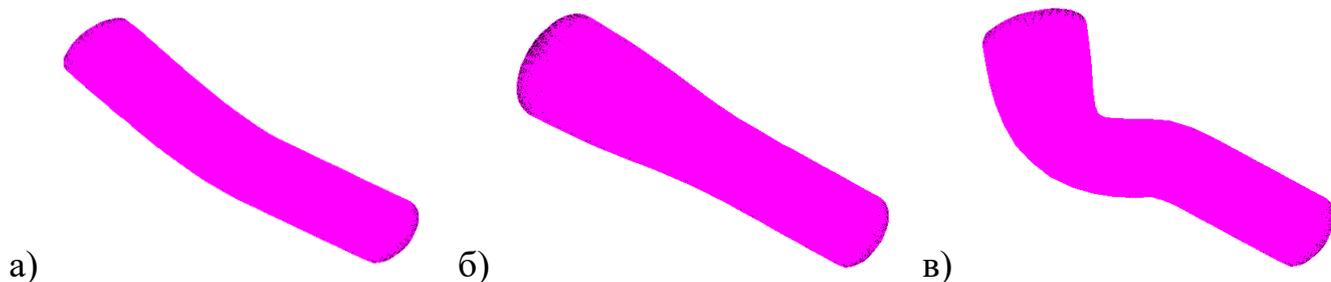


Рисунок 5. Формы колебаний модели при разных гармониках: а – первая (вторая); б – третья; в – четвертая.

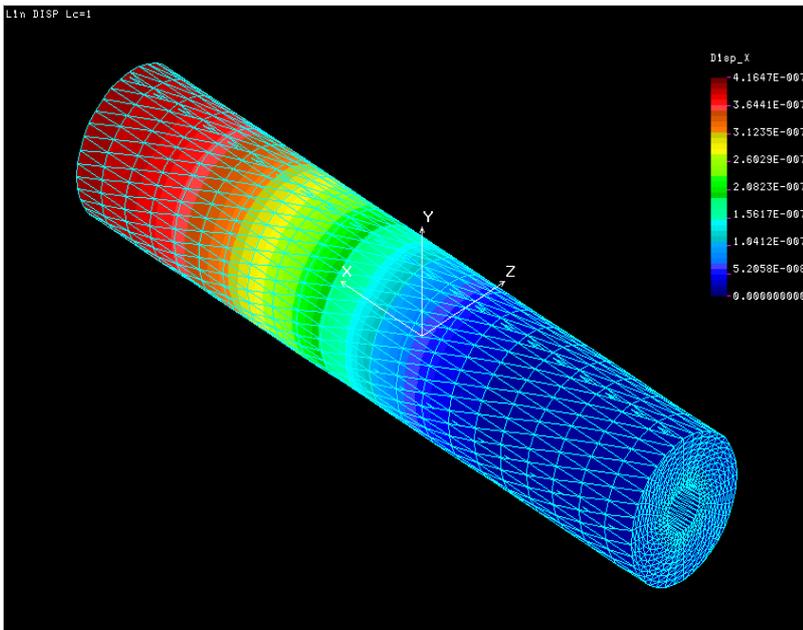


Рисунок 6. Статический расчет напряжений без сопротивления среды

Расчётным и экспериментальными 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 рис. 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, но это требует экспериментального подтверждения. Для этого необходимо разработать акустическую вибрационную установку и методику экспериментальных исследований.

В третьем разделе «Методика экспериментального исследования АООКУС» приведена методика проведения АООКУС, выбраны образцы для исследований, да-

но описание приборов, технологии, оборудования и общей методики проведения экспериментальных исследований АООКУС.



Для осуществления АООКУС была разработана акустическая виброустановка (рис. 7) включающая: 1 – генератор импульсов колебаний частот звукового диапазона с мощностью 0,4 кВт, с импульсной мощностью 30 кВт; 2 – ЗКС, 3 – осциллограф, 4 – виброметр ПИ-19, 5 – система регистрации и управления на базе ПК.

Рисунок 7. Общий вид акустической виброустановки

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

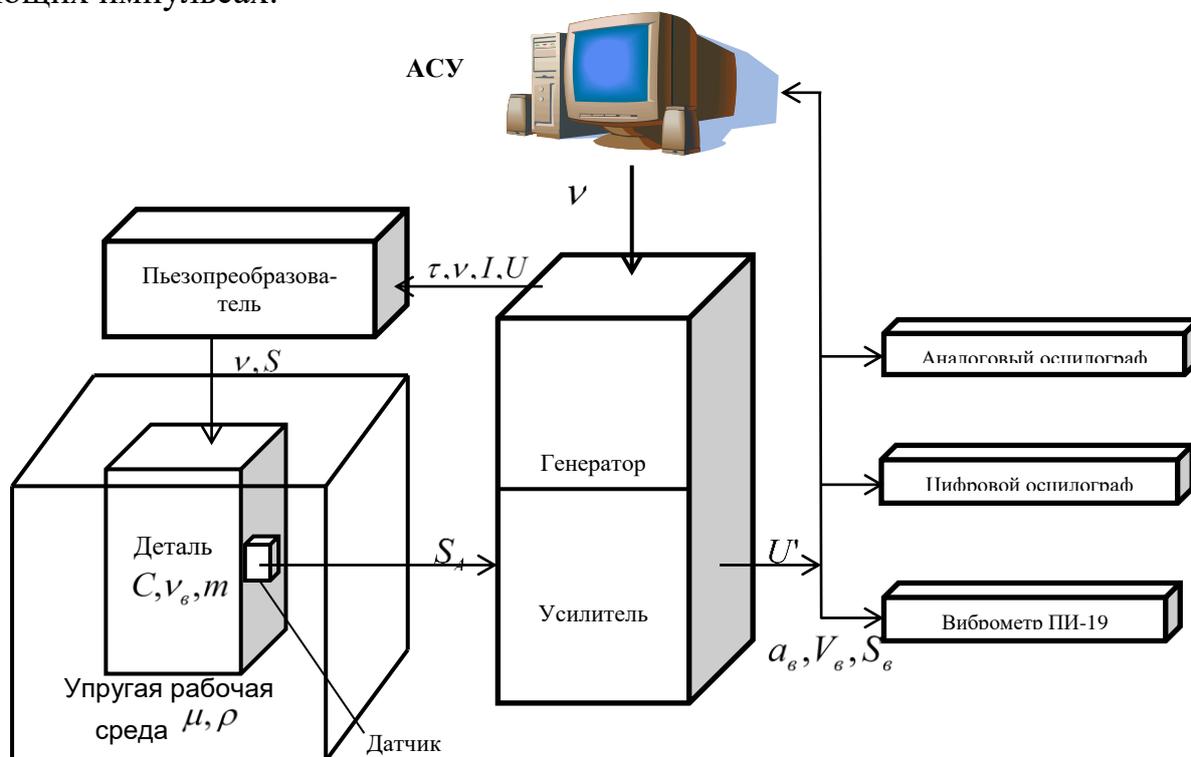


Рисунок 8. Схема виброустановки

Основными элементами вибрационной установки является разработанный задающий звуковой генератор ЗГ 01 (рис. 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.

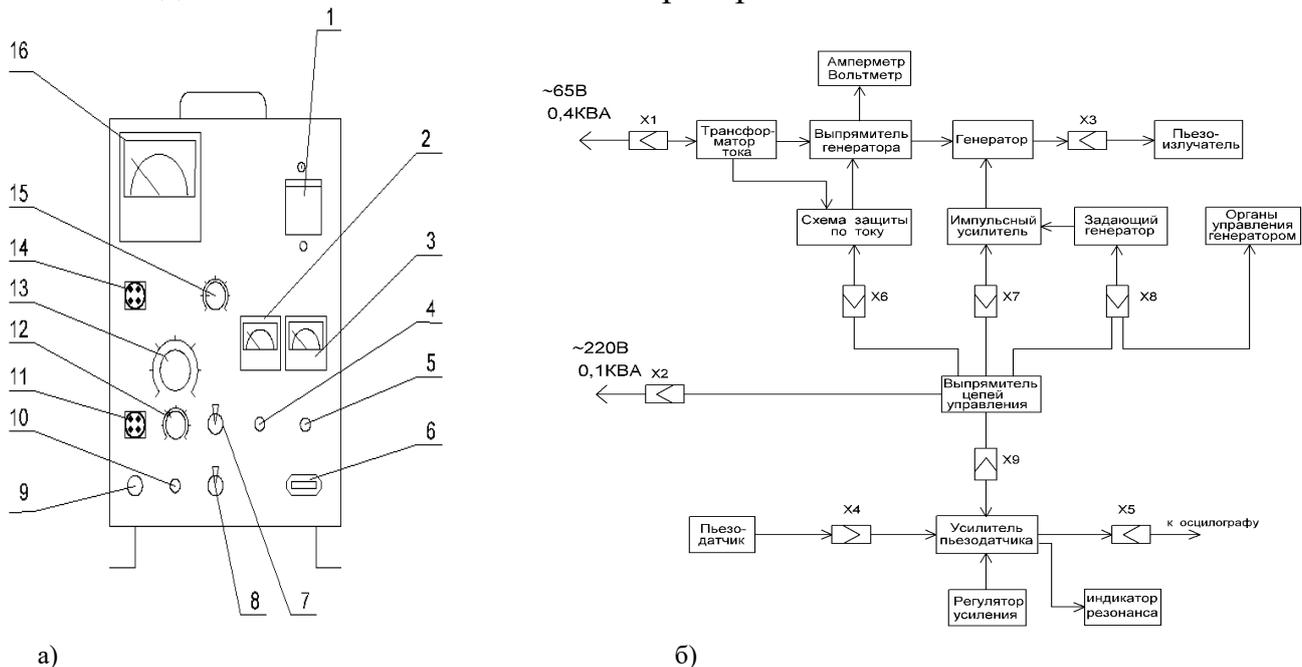


Рисунок 9. Схема панели управления (а) и структурная схема (б) ЗГ-01:

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 - регулятор «Чувствительность»; 16 - индикатор резонанса.

В разделе 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.

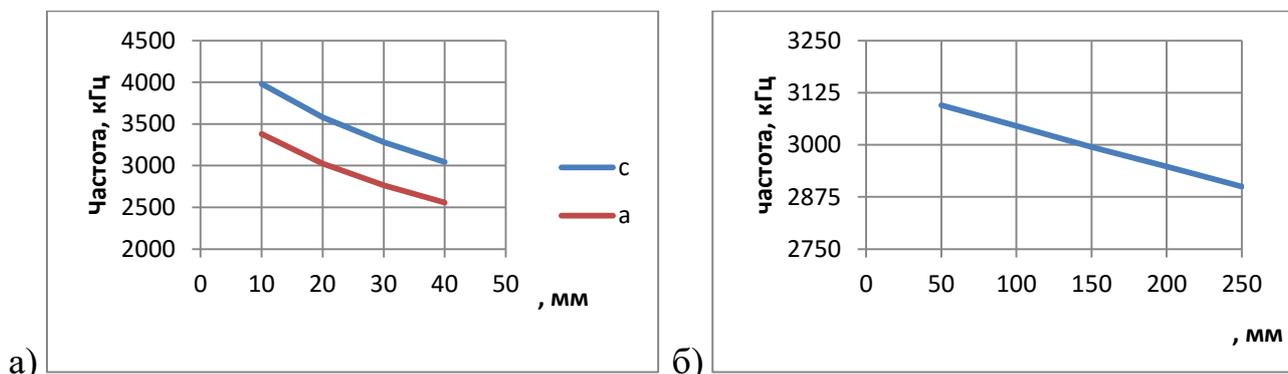


Рисунок 10. Зависимость резонансной частоты колебаний концентратора от:

а) диаметра c и длины a ; б) длины b .

При увеличении диаметра цилиндрической части концентратора и его длины резонансная частота уменьшается, как показано на рис. 10 а. При фиксированных размерах цилиндрической части концентратора увеличение длины его профилированного участка приводит к резкому уменьшению резонансной частоты (рис. 10 б). При этом коэффициент усиления колебаний остается неизменным.

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

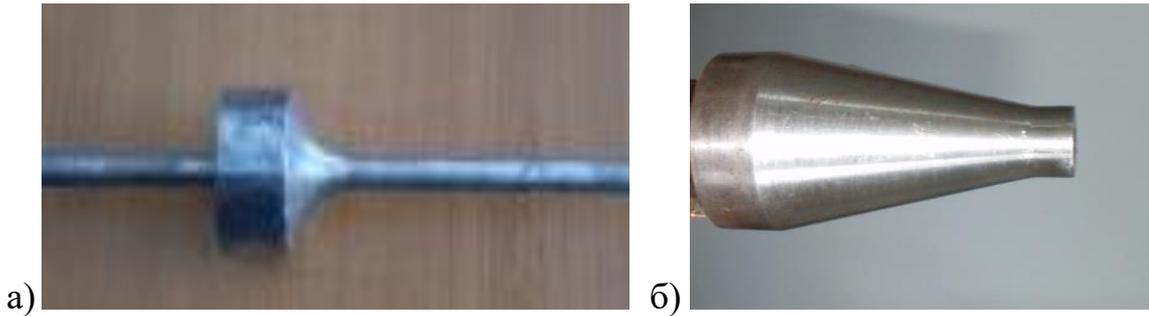


Рисунок 11. Концентратор: а) цилиндрическо-профилированный (№1), б) конусообразный (№2)



Рисунок 12. - Образцы для исследований

Исследовалось влияние АООКУС 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, разработана вибрационная установка, выбраны контрольно-измерительные приборы, разработана методика эксперимента. В дальнейшем необ-

ходимо определить влияние АООКУС и его технологического обеспечения на качество поверхностного слоя.

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 (табл. 1).

Таблица 1- Уровни факторов отсеивающего эксперимента

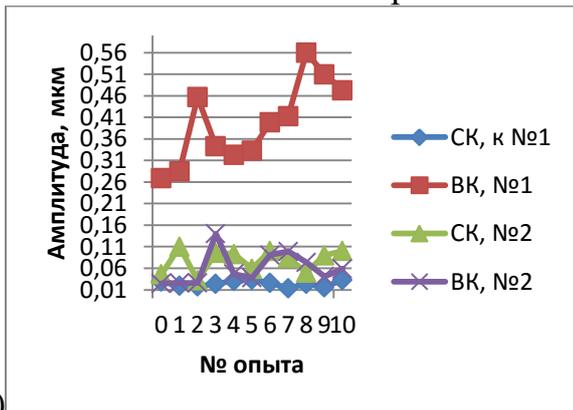
Классификация фактора	Расшифровка фактора	Уровни варьирования		
		-1	0	+1
X ₁	Исходная микротвердость ПС	72 НВ	76 НВ	80НВ
X ₂	Исходная шероховатость ПС	0,8 мкм	1мкм	1,2 мкм
X ₃	Время обработки	5 минут	10минут	15 минут
X ₄	Способ предварительной обработки	точение	фрезерование	шлифование
X ₅	Амплитуда 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 табл. 2.

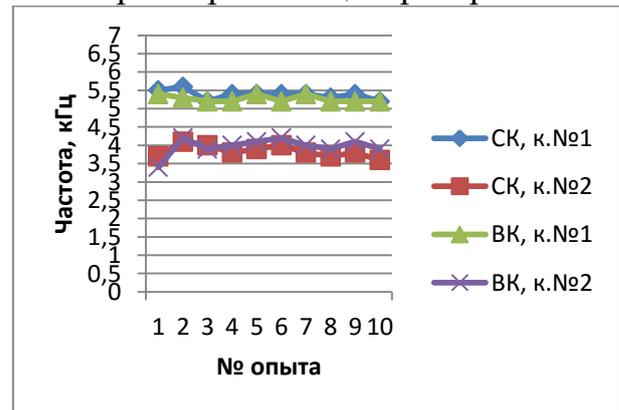
Таблица 2 - Уровни факторов полного двухфакторного эксперимента

Наименование и обозначение факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	+1	
Время обработки-Х ₁ , мин	5	10	15	5
Состав технологической жидкости – Х ₂	№1	№2	№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 (рис. 11 - 12), 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 (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 разные (рис. 13), АЧХ при разных значениях импульсов генератора совпадают по частотным значениям пиков, но отличаются по значениям амплитуды на пиках.

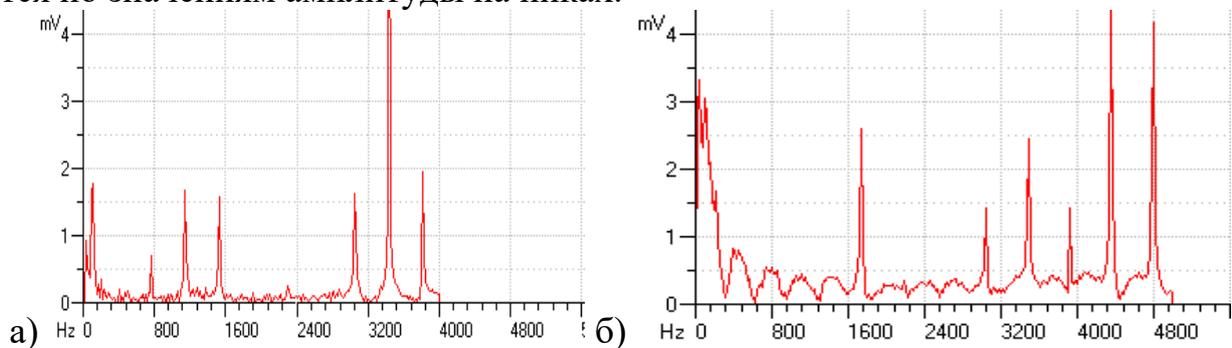


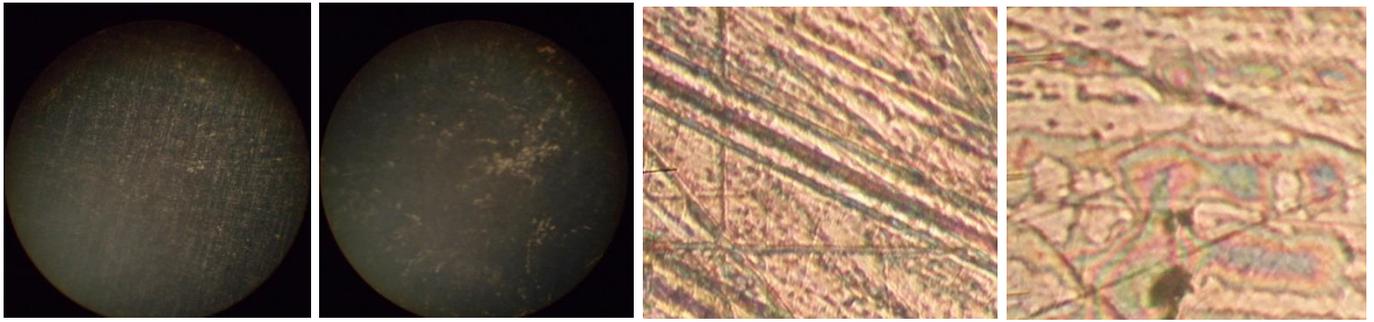
Рисунок 15. АЧХ колебаний системы с концентратором: а) цилиндрическо-профилированным; б) конусным.

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

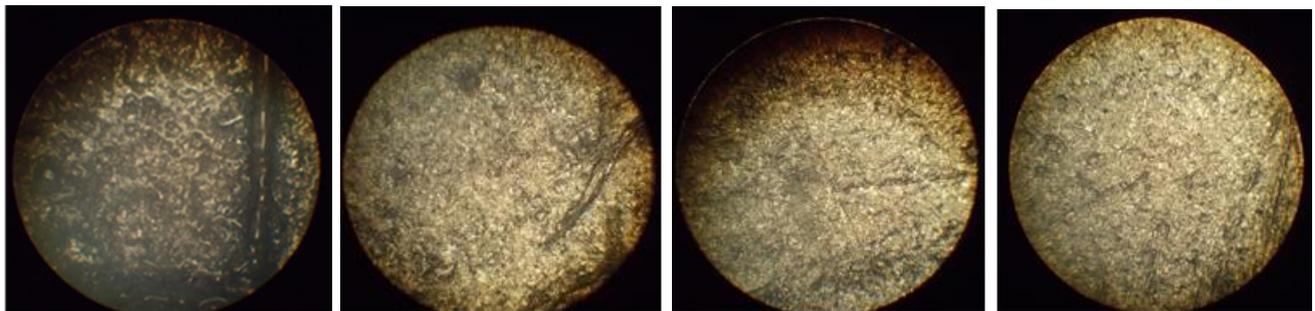
После обработки пластин в индустриальном масле установлены изменения ПС пластин (табл. 3). Твердость ПС увеличилась от 72...76 НВ до 81...86 НВ.

По результатам исследования микротвердости образца из стали 40, резонанс $f=2500$ Гц построены графические зависимости твердости поверхности от времени обработки (рис. 18- 19).

Самый большой эффект наблюдается при обработке на резонансной частоте.



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 3- 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

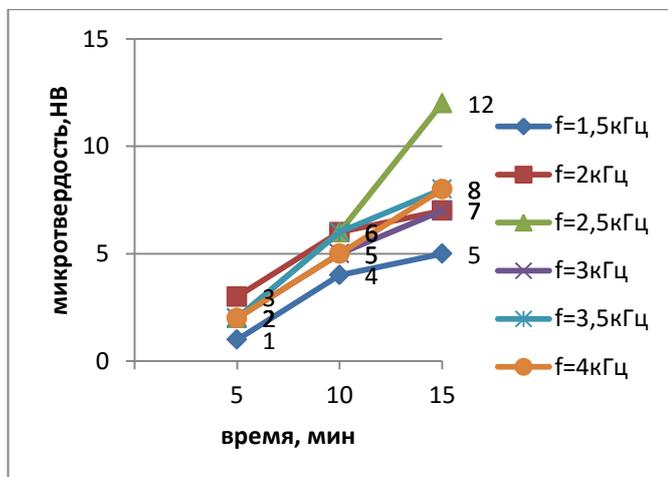


Рисунок 18. Зависимости увеличения микротвёрдости от времени

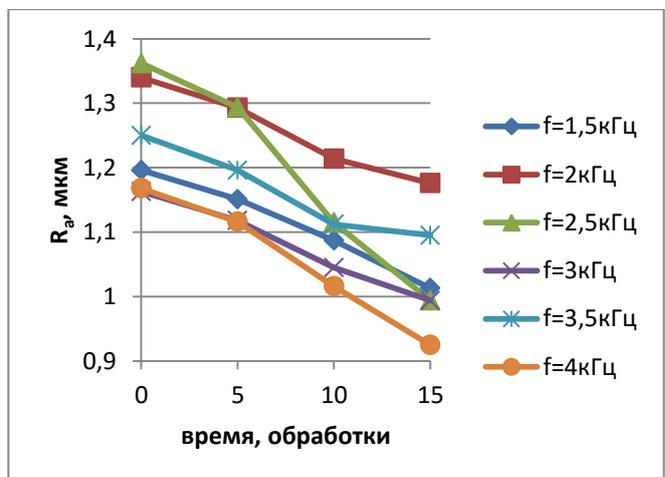


Рисунок 19. Зависимости шероховатости от времени обработки

О происходящих на уровне микронеровностей изменениях свидетельствуют кривые Аббота, полученные в результате обработки профилограмм, снятых с поверхности образцов до и после обработки (рис. 20).

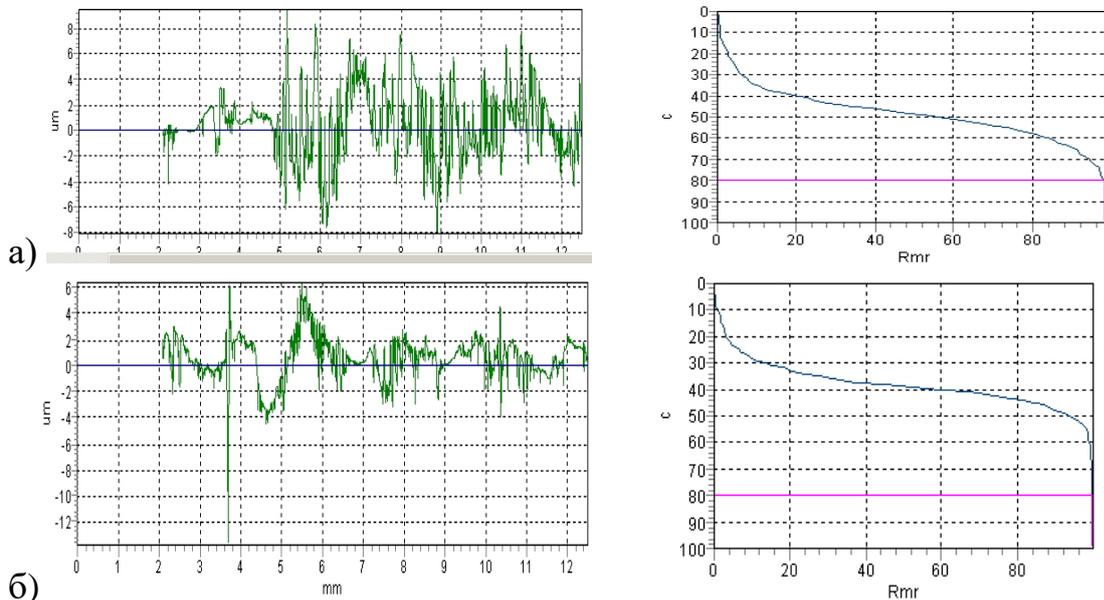


Рисунок 20. Изменение микропрофиля и кривая Аббота до обработки - а, после обработки - б.

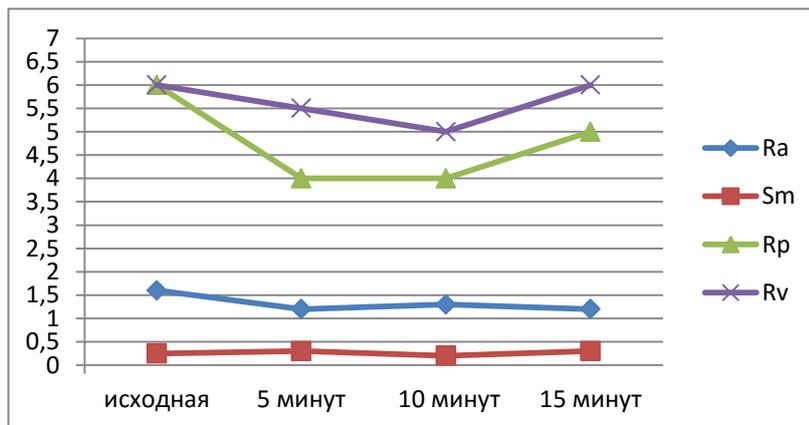


Рисунок 21. Зависимость параметров шероховатости от режимов обработки

Анализируя графики и профилограммы можно сделать вывод, что наиболее эффективное время обработки 8-12 минут.

С помощью регрессионного анализа были получены аналитические зависимости параметров поверхностного слоя (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:

- 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 твердости стали 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 метода 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 и продлению срока службы деталей, продлением межремонтных сроков работы машин за счет повышения эксплуатационных свойств деталей пар трения, уменьшением количества используемых деталей на протяжении всего срока службы машины приводит к уменьшению использования материалов на изготовление запасных частей.

В приложении приводится, разработка полиномиальных моделей, программа расчёта геометрических размеров концентратора, профилограммы шероховатости поверхности при различных технологических режимах резания, акты внедрения, титульный лист патента.

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 обеспечения 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 анализом воздействия на ПС параметров 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. Основными 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 позволяют с вероятностью 0,95 определить значение параметра от режимов обработки.

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

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Матвієнко С.А. Аналіз підвищення показників надійності деталей автомобілів за рахунок використання зносостійких покриттів // Тези 2-ої щорічної міжвузівської НТК «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (Донецьк, 2–3 грудня 2010 року). – Донецьк, ДонІЗТ, 2010. – С. 56. (автором виконан аналіз технологій підвищення довговечності деталей автомобілей).

2. Ковалевський С.В., Матвієнко С.А. Особливості енергозберігаючих технологій зміцнення робочих поверхонь деталей автомобілів // Матеріали III міжнародної НПК «Логістика промислових регіонів» (Донецьк–Святогорськ, 06-09 квітня 2011 року) – Донецьк, ДонІЗТ, 2011. – С. 373–376. (проведен аналіз ресурсозберігаючих технологій упрочнення робочих поверхностей деталей).

3. Матвієнко О.П., Сакно О.П., Лукічов О.В. Розробка ресурсозберігаючої фі-

нішної зміцнюючої вібраційно-резонансної обробки деталей / Матеріали III-ої міжвузівської НТК «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування». (Донецьк, 29–30 листопада 2011 року). – Донецьк, ДонІЗТ, 2011. – С. 150–152. (автором пропонується спосіб вібраційної обробки).

4. Ковалевський С.В. Аналіз засобів підвищення якості деталей автомобілів енергозощаджувальною вібраційною обробкою / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, О.П. Сакно, О.В. Лукічов // Український міжвузівський науково-технічний збірник [Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні]. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2011. – Вип. 45. – С. 309–312. (автором виконано аналіз способів підвищення якості деталей автомобілів).

5. Ковалевський С.В. Аналіз причин недостатнього строку служби деталей підвіски вантажного автомобіля та методи його підвищення на прикладі пальця ресори / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, О.Ю. Деньщиков, О.В. Лукічов // Вісник СевНТУ [Машиноприладобудування та транспорт]. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – Вип. 135/2012. – С. 26–29. (автором проведено аналіз умов експлуатації та структури зношених поверхностей деталей підвіски вантажного автомобіля).

6. Ковалевський С.В. Технологічне забезпечення зносостійкості поверхневого шару деталей автомобілів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, О. В. Лукічов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка [Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві]. – Харків : ХНТУСГ, 2012. – Вип. 122. – С. 122–127. (автором запропоновано теоретичну модель упрочнюючої обробки в упругій середовищі).

7. Ковалевський С.В. Моделювання коливальних процесів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, О.Ю. Деньщиков, О.В. Лукічов // Збірник наукових праць [Галузеве машинобудування, будівництво]. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Вип. 2(32), т.1. – С. 93–99. (автором смодельовано поведінку деталі-представителя при вимушених коливаннях).

8. Ковалевський С.В. Аналіз стану проблеми реновації деталей автомобілів технологічними методами / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, О. В. Лукічов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – Вип. №3(62). – 2012. – С. 74–78. (автором розроблено технологічну схему вібраційної обробки).

9. Матвієнко С.А. Повышение износостойкости деталей грузовых автомобилей технологическими методами: анализ и перспективы развития / Донченко Е.И., Лукичев А.В., Писанец А.А. // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту: Донецьк, 2012. – Вип. 4. – С. 78–86. (автором проведено аналіз методів підвищення зносостійкості деталей автомобілів).

10. Ковалевський С.В. Автоматизація управління установкою для здійснення процесу зміцнюючої вібраційної обробки в пружному середовищі / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, О.П. Сакно, О.В. Лукічов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» [Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні]. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2012. – Вип. 746. – С. 128–131. (автором розроблено генератор звукових коле-

баний).

11. Ковалевський С.В, Матвієнко С., Лукічов О. Спосіб зміцнювальної вібраційної обробки в пружному середовищі та установка для його здійснення // 3-я міжнародна НТК «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2012. – С. 72–73. (автором предложена установка для осуществления упрочняющей обработки).

12. Ковалевський С.В. Метод звукової вібраційної обробки та його експериментальні дослідження / С.А. Матвієнко, О.П. Сакно, О.В. Лукічов // Міжвузівський збірник [Наукові нотатки]. – Луцьк :, 2013. – Вип. 37. – С. 177–182. (автором получены результаты экспериментальных исследований).

13. Ковалевський С.В. Зміна характеристик робочих поверхонь деталей при звуковій вібраційній обробці в пружному середовищі / Ковалевський С.В., Матвієнко С.А., Лукічов О.В., Сакно О.П. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» [Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні]. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2013. – Вип. 746. – С. 33–38. (автором експериментально досліджено изменение параметров поверхностного слоя привибрационной обработке в квазиупругой среде).

14. VIBRATION SOUND PROCESSING IN AN ELASTIC ENVIRONMENT AND A DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION / S. Kovalevskyu, S. Matvienko, I. Starodubcev, O. Lukichov // 13th International conference "Research and Development in Mechanical Industry." – RaDMI 2013, 12–15 September. – Kopaonik, Serbia, 2013. – P. 205–211.

15. Лукічов О.В. Експериментальні дослідження методу звукової вібраційної обробки та управління його технологічними параметрами / Лукічов А.В., Ковалевський С.В., Матвієнко С.А. // Сборник трудов XX международной научно-технической конференции. [Машиностроение и техносфера]. – Донецк: ДонНТУ, 2013. Т.2. – С. 88–93. (автором експериментально досліджан метод звукової вібраційної обробки).

16. Матвієнко С.А. Реновація деталей автомобіля технологічними методами в системі їх технічної експлуатації / С.А. Матвієнко, А.В. Лукичев, О.П. Сакно, О.А. Англезі // Проблеми автомобільно-дорожнього комплексу Росії: // Матеріали X міжнарод. заочн. науч.-техн. конф. [Експлуатація і розвиток автомобільного транспорту], (Пенза, 31 жовтня 2013 г.). – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 119–126. (автором определены перспективы развития реновации деталей автомобилей).

17. Матвієнко С.А., Лукічов О.В., Сакно О.П. Поліпшення трибологічних характеристик робочих поверхонь пар тертя вузлів автомобіля // Матеріали III міжнародної НПК «Логістика промислових регіонів» (Донецьк–Святогорськ, 3-4 квітня 2013 року) – Донецьк, ЛАНДОН-XXI, , 2013 – с. 204–207. (автором выполнен анализ способов улучшения качества поверхности деталей пар трения).

18. Розналович Н.Н., Матвієнко С.А., Лукичев А.В. Улучшение трибологических характеристик пар трения узлов автомобиля технологическими методами // IX международный форум молодежи «Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке». – Харьков, ХНТУСХ, 2013. – с. 98, с. 326. (автором получены результаты экспериментальной вибрационной обработки алюминиевого сплава АД0 в упругой среде).

19. Матвієнко С.А. Забезпечення показників надійності деталей формуванням параметрів якості поверхні вібраційною обробкою / С.А. Матвієнко, О.П. Сакно, О. В. Лукічов, О.В. Рейвах // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка [Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва]. -Харків : ХНТУСГ, 2014. – Вип. 151. – С. 122–127. (автором пропонується і обґрунтований метод підвищення довговічності деталей за рахунок зміни якості поверхневого шару).

20. Матвиенко С.А. Технологическое обеспечение износостойкости деталей за счет формирования параметров качества поверхности вибрационной отделочно-упрочняющей обработкой / Матвиенко С.А., Лукичев А.В., Сакно О.П. // Материалы 15-ой междунар. научн.-практ. конф. [«Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы»]. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. - С. 172-178. (автором предложено технологическое обеспечение износостойкости деталей).

21. Матвиенко С.А. Обеспечение показателей надежности деталей при формировании параметров качества поверхности вибрационной обработкой / Матвиенко С.А., Ковалевский С.В. Лукичев А.В., Сакно О.П. // Машиностроение и техносфера. Сборник трудов XXI международной научно-технической конференции. [Машиностроение и техносфера], (Севастополь). – Донецк: ДонНТУ, 2014. – С. 149–152. (автором теоретически исследован механизм формирования поверхностного слоя при акустической вибрационной обработке в жидкой среде).

22. Ковалевский С.В., Матвієнко С.А., Лукічов О.В., Сакно О.П. Зміна характеристик робочих поверхонь деталей при звуковій вібраційній обробці в пружному середовищі // Збірник наукових праць II-ої науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні». – Львів, 2014. – С. –34. (автором проведені експериментальні дослідження вібраційної обробки в еластичному середовищі).

23. Матвиенко С.А. Развитие ресурсосберегающих технологий финишной отделочно-упрочняющей при изготовлении деталей машин / С.А. Матвиенко, А.В. Костенко, А.В. Лукичев, О.П. Сакно // Вестник КамчатГТУ. – Петропавловск на Камчатке: ПТУ, 2015. – Вып. 34. – С. 19–23. (автором получены результаты изменения износостойкости до и после обработки).

24. Михайлов А.Н. Технологическое обеспечение звукорезонансной отделочной обработки в квазиупругой среде / А.Н. Михайлов, Матвиенко С.А., Лукичев А.В. // Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции. [машиностроение и техносфера]. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – с. 88–93. (автором предложена установка для осуществления акустической отделочно-упрочняющей обработки деталей)

25. Патент на корисну модель UA 98504 U, МПК (2015.01)B23P 9/00. Спосіб вібраційної оздоблювальної обробки деталей у квазіпружному середовищі / Ковалевський С.В., Матвієнко С.А., Тулупова К.В.; власник Донбаська Державна машинобудівна академія. – заявл. 05.12.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. №8. – 2 с.