

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

На правах рукописи

**Матвиенко Сергей Анатольевич**

УДК 621.9.048.6

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

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

**Диссертация**  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Лукичев Александр Владимирович

Идентичность всех экземпляров  
диссертации подтверждаю  
Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 01.014.02



*Грубка*

Грубка Р.М.

Донецк 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПС РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН .....	15
1.1. Анализ влияния параметров качества ПС на срок службы деталей машин .....	15
1.1.1. Влияние геометрических параметров ПС на износостойкость рабочих поверхностей деталей .....	18
1.1.2. Влияние физико-механических свойств ПС на его износостойкость .....	20
1.1.3. Выбор комплексного параметра качества ПС для технологического обеспечения износостойкости.....	21
1.2. Анализ влияния процесса приработки на износостойкость и формирование равновесной шероховатости .....	23
1.3. Анализ применяемых технологических процессов для достижения качества рабочих поверхностей деталей .....	25
1.4. Анализ преимуществ и особенностей вибрационных методов обработки .....	30
1.5. Теоретические предпосылки для разработки АООКУС .....	34
1.6. Структурная схема работы.....	40
Выводы по первому разделу .....	42
РАЗДЕЛ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АООКУС .....	43
2.1. Технологический процесс АООКУС .....	43
2.2. Механизм формирования ПС при АООКУС .....	49
2.3. Разработка структурно-функциональной модели обеспечения качества ПС при АООКУС .....	54
2.4. Взаимодействие ПС детали с квазиупругой средой при АООКУС.....	61
2.5. Диффузионная модель описания процесса упрочения и отделки ПС	

технологическим ППД в квазиупругой среде .....	62
2.6. Структурно-энергетический анализ процесса обработки ПС АООКУС .....	64
2.7. Кавитационные процессы при АООКУС .....	65
2.8. Расчёт напряжений в ПС при АООКУС .....	66
2.8.1 Моделирование образца исследования.....	66
2.8.2 Расчёт статического и динамического нагружений образца исследований .....	71
2.8.3 Влияния вязкоупругой среды на процесс колебаний .....	73
Выводы по второму разделу .....	76
<b>РАЗДЕЛ 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	
АООКУС .....	77
3.1. Разработка вибрационной установки для осуществления АООКУС .....	77
3.1.1. Разработка генератора .....	80
3.1.2. Выбор ЗКС .....	84
3.1.2.1. Разработка пьезопреобразователя .....	86
3.1.2.2. Моделирование концентратора линейных колебательных процессов.....	90
3.1.2.3. Проектирование концентратора ЗКС .....	93
3.1.3. Выбор концентратора .....	97
3.1.4. Приборы и приспособления для измерений в процессе исследований.....	98
3.1.5. Образцы для исследований .....	101
3.1.6. Технологические жидкости .....	102
3.2. Методика проведения экспериментальных исследований .....	103
3.2.1. Методика исследований шероховатости поверхности .....	104
3.2.2. Методика измерения маслостойкости ПС .....	105
3.3. Определение исследуемых факторов влияющих на качество ПС при АООКУС .....	104
3.4. Структура проведения экспериментов .....	107
Выводы по третьему разделу .....	112
<b>РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА АООКУС НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И</b>	

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПС.....	113
4.1. Планирование эксперимента .....	113
4.2. Исследование АЧХ собственных колебаний и вынужденных колебаний детали в резонансном режиме. ....	114
4.3. Топография ПС.....	118
4.4. Микротвердость .....	121
4.5. Исследования микротвердости образца пластины 150x30x2 мм, Сталь 40 , резонанс $f=2500$ Гц.....	121
4.6. Исследования микротвердости образца пластины 150x30x3 мм, дюралюминий, резонанс $f=2500$ Гц.....	124
4.7. Зависимость амплитудно-частотной характеристики колебаний детали в зависимости от частоты сигнала от генератора .....	127
4.8. Зависимость высотных и шаговых параметров шероховатости от режимов обработки.....	128
4.8.1. Исследования шероховатости образца пластины 150x30x2 мм, Сталь 40, резонанс $f=2500$ Гц .....	128
4.8.2. Исследования шероховатости образца пластины 150x30x3 мм, дюралюминий, резонанс $f=2500$ Гц .....	130
4.9. Анализ профилограмм и опорной кривой обрабатываемой поверхности .....	134
4.10. Исследование влияния АООКУС на маслоёмкость и площадь фактического контакта обрабатываемой поверхности .....	134
4.11. Регрессионный анализ результатов эксперимента.....	137
Выводы по четвертому разделу .....	141
<b>РАЗДЕЛ 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>143</b>
5.1. Перспективы применения АООКУС.....	140
5.2. Экономический эффект от применения АООКУС.....	144
5.3. Внедрение АООКУС.....	145
5.4. Применение результатов проведенных исследований в учебном процессе .	146
Выводы по пятому разделу .....	146

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ П1 ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КОНЦЕНТРАТОРА ЗКС .....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ П2. АЧХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБРАЗЦА ЗАКРЕПЛЕННОГО В ЗКС НА КОНЦЕНТРАТОРЕ №1 .....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ П3 АЧХ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБРАЗЦА ЗАКРЕПЛЕННОГО В ЗКС НА КОНЦЕНТРАТОРЕ №1 .....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ П4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ П5 ПРОФИЛОГРАММЫ ИСХОДНОГО КАЧЕСТВА ПС И ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ .....	179
ПРИЛОЖЕНИЕ П6 ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ВИДЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТКЛИКА .....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ П7 АКТ О ВНЕДРЕНИИ .....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ П8 АКТ О ВНЕДРЕНИИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС .....	194

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний момент одна из важнейших задач технологии машиностроения это повышение надежности и долговечности деталей узлов трения агрегатов и машин. Одним из направлений решения этой задачи является совершенствование существующих и создание новых методов отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) рабочих поверхностей деталей.

Долговечность и надёжность деталей, агрегатов и машин в целом, обеспечивается в основном качеством рабочих поверхностей деталей пар трения. Поэтому актуальным направлением развития машиностроения является разработка инновационного технологического обеспечения процессов формирования поверхностного слоя, с высокими эксплуатационными характеристиками (износостойчивость, задиростойкость, усталостную прочность, антикоррозионную стойкость) [8, 11, 25, 9]. Работоспособность агрегатов и узлов машин зависит в основном от технологического обеспечения заданного качества поверхностного слоя, которое направленно формируется на финишных операциях технологического процесса их изготовления [52]. При этом для рационального использования трудовых и природных ресурсов необходима разработка высокопроизводительных энергосберегающих технологий.

В процессе эксплуатации под влиянием внешних и внутренних факторов изменяется состояние рабочих поверхностей деталей пар трения. Статистический анализ свидетельствует о том, что 85-90% отказов машин связано с износом рабочих деталей пар трения [95,110]. По данным исследований В.В. Бледных, В.В. Ерофеева, П.Н. Лапшина, В.П. Пономарева, Н.И. Косилова и др., до 85% всех отказов деталей машин вызваны износом, задирками, микротрещинами и усталостным разрушением материала, начинающимися с поверхности детали. Для опор качения характерен абразивный износ, для опор скольжения - абразивный износ-заедание, для валов - износ шеек, для корпусных деталей - повреждение посадочных мест [83].

Резервом повышения износостойкости деталей в машиностроении есть технологическое обеспечение заданных параметров качества их поверхностного слоя. Актуальными остаются исследования, направленные на усовершенствование известных и разработку новых высокоэффективных способов обработки рабочих поверхностей деталей пар трения, используемых на финишных этапах технологического процесса изготовления деталей и обеспечивающих высокий уровень их эксплуатационных свойств.

**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 исследования.** 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., Суслова 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 приближенного 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.

**Связь работы с научными программами и темами.** Материалы диссертации являются обобщением исследований, выполненных в рамках комплексной целевой программы: Стратегии 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 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, 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 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 АО-ОКУС 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 и специально разработанных 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 технологіях сучасного матеріалознавства і машинобудування» (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 века» (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.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 27 научных трудах, из которых 10 в профессиональных изданиях рекомендуемых ВАК, 10 по материалам научно-технических конференций и семинаров, 6 в иностранных изданиях, 1 патент.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, перечня использованных источников и приложений. Общий объём диссертации составляет 194 страниц, с которых 148 страниц основной части, 76 рисунков, 31 таблиц, 150 литературных источников на 15 страницах и 8 приложений.

# РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПС РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

## 1.1. Анализ влияния параметров качества ПС на срок службы деталей машин

Под качеством поверхности детали понимают состояние ее ПС, образовавшееся в результате воздействия на него одного или нескольких последовательно применяемых технологических методов. Под термином «поверхностный слой» понимается сама поверхность и ее некоторый ПС, отличающийся от материала сердцевины детали [7].

Согласно ГОСТ 27.002-83, долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Предельное состояние изделия характеризуется невозможностью дальнейшей его эксплуатации, снижением эффективности или безопасности.

Основными оценочными показателями долговечности, являются технический ресурс и срок службы, определяемые эксплуатационными свойствами деталей и их соединений: усталостной прочностью, коррозионной стойкостью, контактной прочностью, фреттинг-стойкостью, герметичностью, контактной жесткостью, износостойкостью, прочностью посадок. В свою очередь эти свойства зависят от группы параметров качества ПС деталей. Схема обеспечения показателей надежности приведена на рисунке 1.1.

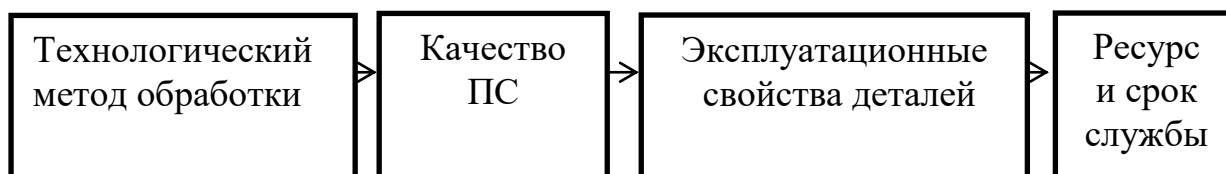


Рисунок 1.1 - Схема обеспечения долговечности деталей

Влияние параметров ПС на эксплуатационные свойства материалов было отмечено еще на ранней стадии развития материаловедения. Исследованиями Балтера М.А., Горленко О.А., Иоффе А.Ф., Крагельского И.В., Рыжова Э.В., Ребиндера П.А., Степанова А.В., Сулова А.Г. и др. установлено значительное влияние параметров качества ПС на эксплуатационные свойства деталей машин. Эксплуатационные свойства деталей машин, такие как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость взаимосвязаны с целым комплексом параметров качества ПС [6, 8, 59, 79, 101, 115, 125]. Параметры ПС представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Характеристики ПС деталей [114]

Свойства ПС	Показатель	Параметры	Условное обозначение
Геометрические	Макрогеометрия	Овальность, конусность, бочкообразность, огранка, выпуклость и т.д. $H_{max}$	X1
	Микрогеометрия	Шероховатость ( $R_a, R_z, R_{max}, S, S_m, t_p$ и т.д.)	X2
	Субмикрогеометрия	Субмикрошероховатость	X3
	Волнистость	Высота $W_z$ , средний шаг $S_w$	X4
	Направление неровностей поверхности		X5
	Маслоемкость		X6
Физико-механические	Структура, фазовый и химический состав	Форма и размеры структурных составляющих	X7
	Твёрдость	Микротвёрдость	X8
	Наклёп	Степень, глубина	X9
	Остаточные напряжения	Микронапряжения, субмикронапряжения (1,2 и 3 рода), величина, знак	X10

На основании психологического эксперимента была построена средняя априорная диаграмма (рисунок 1.2), позволяющая определить влияние опреде-



ленного показателя ПС на долговечность детали.

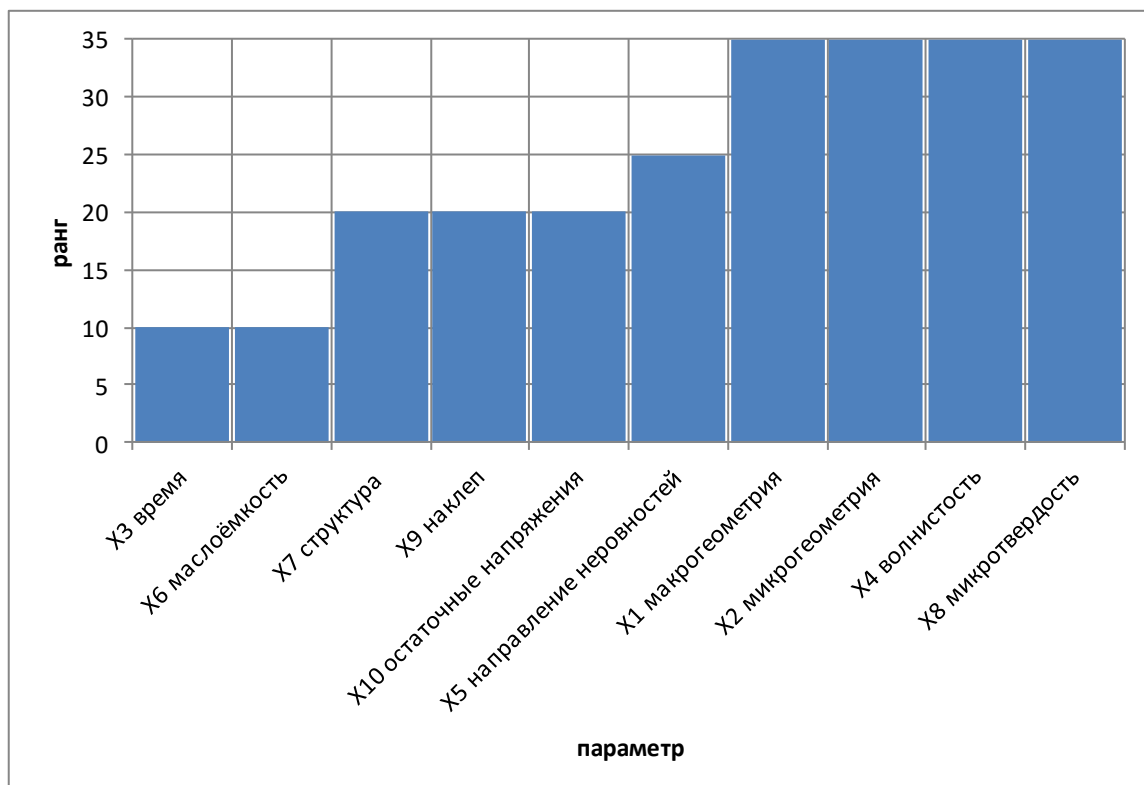


Рисунок 1.2 - Средняя априорная диаграмма значимости параметров ПС в определении долговечности детали

Долговечность деталей пар трения в основном характеризуются износостойкостью их рабочих поверхностей. Связь характеристик качества ПС с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что рабочая поверхность должна быть достаточно твёрдой, иметь сжимающие остаточные напряжения, мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большой площадью опорной поверхности [86, 120].

На наиболее распространённый для деталей машин абразивный износ оказывает влияние шероховатость, микротвёрдость, твёрдость, структура и фазовый и химический составы. Волнистость, погрешности формы и остаточные напряжения не оказывают существенного влияния на износостойкость при абразивном изнашивании [114].

### 1.1.1. Влияние геометрических параметров ПС на износостойкость рабочих поверхностей деталей

Макрогеометрия ПС определяет условия трения и является важным фактором, влияющим на работоспособность деталей [149]. Волнистость и макронеровности определяют контурную площадь касания. Наличие волн уменьшает опорную площадь в 5 – 10 раз [149]. Высота волнистости  $W_z$  оказывает более значимое влияние на износостойкость ПС, чем средний шаг волнистости  $S_w$ , так как она больше сказывается на величине опорной площади.

Проведенные авторами работ [65, 75, 86] эксперименты показывают, что коррозионная стойкость деталей улучшается по мере повышения степени плавности и упорядоченности неровностей поверхности. Волнистость и направление следов обработки поверхности хотя и оказывают влияние на износостойкость деталей, однако они менее значительны по сравнению с шероховатостью [13, 18].

Микрогеометрия поверхностей деталей является одним из основных показателей ПС, определяющих надежность и долговечность изделий при изнашивании всех видов [63, 98]. Фундаментальные исследования в области изучения влияния микрогеометрии поверхности на конкретные эксплуатационные свойства представлены в работах Бутенко В.И., Крагельского И.В., Комбалова В.С., Маталина А.А., Сулова А.Г., Шнейдера Ю.Г. и др.

Исследования, выполненные Безъязычным В.Ф. [13] позволили установить, что минимальная шероховатость поверхности не всегда обеспечивает её высокую износостойкость. В результате исследований влияния параметров качества ПС на износостойкость в работе [87] выявлено, что коэффициент трения возрастает с увеличением высотных параметров профиля  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  и уменьшается с увеличением относительной опорной длины профиля  $t_p$  и среднего шага неровностей  $S_m$ . Интенсивность изнашивания сопряженных поверхностей зависит от величины фактического контакта и их напряженного состояния, которые определяются размерами и формой неровностей, в частности радиусами закруглений выступов и впадин микронеровностей [1]. С уменьшением высоты неровностей наблюдается

общая тенденция к уменьшению углов профиля и соответствующему увеличению радиусов закругления выступов. Геометрические характеристики микронеровностей связаны между собой. С уменьшением высоты микронеровностей, при каждом методе обработки возрастает соотношение между средним шагом неровностей профиля  $S$  и высотой  $R_{max}$ . Чем больше радиусы закругления выступов, тем меньше углы профиля и больше размеры оснований отдельных неровностей и их шаг.

По данным Сулова А.Г. несущая способность ПС при неизменных  $R_a$  и  $R_{max}$  тем больше, чем меньше расстояние от линии выступов до средней линии  $R_p$  и чем больше радиусы скругления вершин и впадин микронеровностей  $r$ . Несущая способность поверхностей, имеющих одинаковые высотные параметры шероховатости и микротвёрдость, но обработанных различными методами, разная [101]. После точения и других методов обработки резанием неровности имеют выраженные пики (рисунок 1.3б) [97]. Наиболее благоприятный «плосковершинный» (рисунок 1.3а) характер микропрофиля, с точки зрения обеспечения минимальной величины износа образуется на поверхности при отделочных методах обработки [24, 38]. По результатам исследований на износ наилучший результат показывают образцы с полукруглым выпуклым профилем [2].

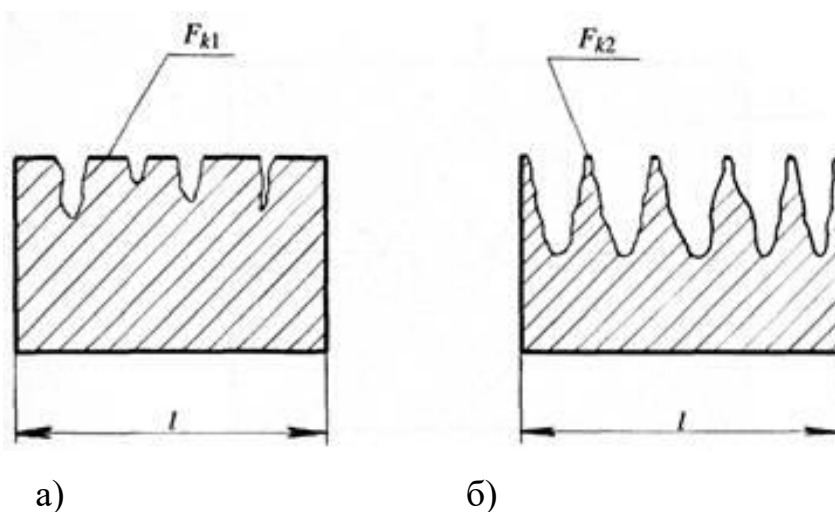


Рисунок 1.3 - Вид микропрофиля обработанной поверхности [97]:

$l$  - базовая длина;  $F_{k1}$ ,  $F_{k2}$  - фактическая площадь контакта соответственно после отделочной (а) и лезвийной или абразивной (б) обработки.

На геометрические показатели качества ПС деталей оказывает влияние технологическая наследственность предыдущих операций [156]. Чем меньше параметры субшероховатости  $R_{ac}$  и  $S_{mc}$ , тем выше напряжение, необходимое для движения дислокаций, а следовательно, меньше интенсивность изнашивания материала на поверхности трения [103]. Чем выше маслосъемность сопряженных поверхностей, тем лучше их эксплуатационные характеристики. Одним из путей повышения маслосъемности поверхности является создание регулярного микрорельефа с масляными микро-карманами при финишной обработке детали [67].

### **1.1.2. Влияние физико-механических свойств ПС на его износостойкость**

Структурное состояние ПС оказывает определяющее влияние на эксплуатационные характеристики материалов - износостойкость, механические свойства (прочность, пластичность, трещиностойкость, выносливость), теплостойкость и коррозионную стойкость [48]. Структурные дефекты ПС, возникающие при шлифовании и других методах обработки резанием значительно снижают износостойкость деталей.

Увеличение микротвёрдости ПС обуславливает повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей. Однако твердость является косвенным критерием износостойкости [25, 12].

Наклёп поверхностных слоев может приводить к повышению износостойкости в условиях всех основных видов износа за исключением абразивного [115]. Деформационное упрочнение (наклёп) ПС оценивают по глубине  $h_n$  и степени наклёпа  $u_n$ , а интенсивность наклёпа — по глубине поверхностного слоя — градиентом наклёпа  $u_{гр}$ .

Различают остаточные напряжения первого, второго и третьего рода (по Давиденкову Н.Н.). Наибольшие напряжения у поверхности могут быть как сжимающими, так и растягивающими. Особенно опасны растягивающие напряжения, которые приводят к понижению усталостной прочности и износостойкости. В

начале процесса трения детали остаточные напряжения в ПС снимаются под действием протекающих пластических деформаций, не успевая оказать заметного влияния на износ. Одновременно в ПС возникают остаточные напряжения сжатия, которые в ряде случаев снижают износ [17, 31].

### 1.1.3. Выбор комплексного параметра качества ПС для технологического обеспечения износостойкости

В процессе эксплуатации происходит взаимосвязанное изменение параметров качества ПС деталей машин. Только технологическое обеспечение рационального значения комплексного параметра качества ПС позволяет в значительной мере повысить их долговечность [34, 36, 51, 60, 62, 95, 129]. Для обеспечения различных эксплуатационных свойств соответствующими методами обработки необходимо рассматривать комплексные параметры, включающие параметры шероховатости, волнистости, макроотклонений, физико-механических свойств [51, 52, 70, 87, 69, 114].

Влияние параметров качества ПС на эксплуатационные характеристики деталей характеризуется показателем интенсивности изнашивания [31, 101]:

$$I_h = \frac{2,5\pi\nu^{0,5} \cdot p^{7/6}}{n \cdot \lambda(\nu+1)t_m^{3/2}(k \cdot \sigma_T)^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi R_a W_z H_{max})^{1/3}}{E \cdot S_m}} = K \frac{(R_a W_z)^{1/6}}{S_m^{1/2} (H_\mu)^{2/3}} \quad (1.1)$$

где:  $p$  - давление на площадке контакта;  $t_m$  - относительная опорная длина профиля на уровне средней линии;  $n$  - число циклов воздействия до разрушения поверхностного слоя;  $\lambda$  - коэффициент, учитывающий знак и значение остаточных напряжений;  $\sigma_T$  - величина остаточных напряжений, МПа;  $k$  - коэффициент упрочнения поверхности;  $\mu$ ,  $E$  - коэффициент Пуассона и модуль упругости материала;  $R_a$  - среднее арифметическое отклонение профиля поверхности трения, мкм;  $S_m$  - средний шаг неровностей, мкм;  $W_z$  - высота волнистости, мкм;  $H_{max}$  -

максимальная величина макроотклонений формы поверхности, мкм;  $K$  – постоянный коэффициент, зависящий от материала детали и условий ее нагружения.

Взаимосвязь эксплуатационных характеристик деталей машин с параметрами качества их ПС представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Взаимосвязь эксплуатационных характеристик деталей с параметрами качества ПС [1, 115, 156]

Свойство	Геометрические показатели													Физико-механические показатели			
	Шероховатость								Макроотклонения		Волнистость			Наклеп		Ост. напряжения	
	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	$S_m$	$R_p$	$S$	$t_p$	$r$	$H_{max}$	$H_p$	$W_z$	$W_{max}$	$S_w$	$H$	$h$	$\sigma$	$h_\sigma$
Износостойкость: сухое трение	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+
трение	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
трение со смазкой	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-
усталостная прочность	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+
коррозионная стойкость	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+

(\* ) - параметры, оказывающие основное влияние на эксплуатационное свойство;

(+) параметры, оказывающие влияние на эксплуатационное свойство;

(-) параметры, не оказывающие существенного влияния на эксплуатационное свойство.

где:  $R_a$  - среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;  $R_z$  - высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм;  $R_{max}$  -наибольшая высота неровностей профиля, мкм;  $S_m$  - средний шаг неровностей профиля;  $R_p$ -высота сглаживания профиля шероховатости;  $S$  - средний шаг местных выступов профиля;  $t_p$  - относительная опорная длина профиля;  $r$ - радиус закругления вершин;  $W_z$  - высота волнистости;  $W_{max}$  – наибольшая высота волнистости;  $S_w$  – средний шаг волнистости;  $H_{max}$  – максимальная величина макроотклонений формы поверхности;  $H_p$  - высотой сглаживания макроотклонения;  $H$ - степень наклепа поверхностного слоя;  $h$ - глубина наклепа поверхностного слоя;  $\sigma$ - остаточные напряжения в поверхностном слое,  $h_\sigma$  - глубина залегания остаточных напряжений.

## 1.2. Анализ влияния процесса приработки на износостойкость и формирование равновесной шероховатости

Износ поверхностей трения при эксплуатации протекает постоянно, начиная с момента работы соединения, но происходит неравномерно. В специальной литературе принято различать три периода износа: первичный, нормальный (эксплуатационный), катастрофический износ (рисунок 1.4) [52].

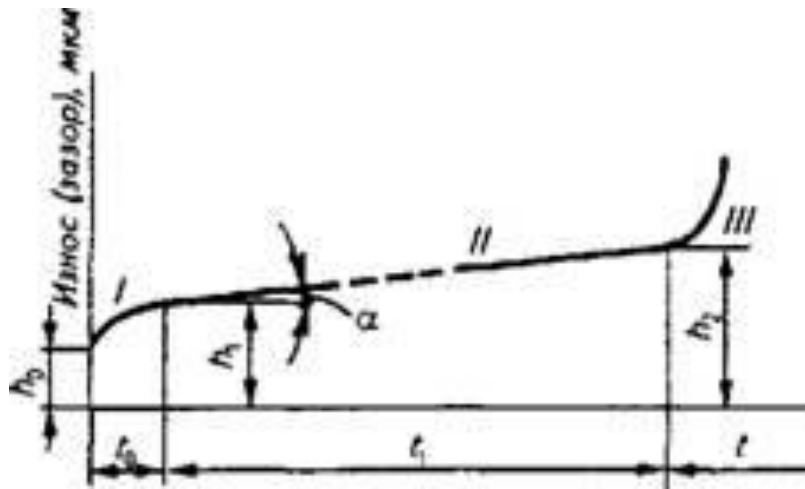


Рисунок 1.4 - Зависимость износа поверхности трения от времени эксплуатации: *I*-первичный износ (приработка), *II*- нормальный износ (эксплуатационный), *III*- катастрофический износ.

В процессе приработки изменяются параметры шероховатости, макроотклонения, волнистости и формируется качество поверхности, зависящее только от условий трения, и не зависящее от финишной обработки и параметров ПС полученных при этом [116, 120, 126]. Приработанная шероховатость может быть либо меньше, либо больше исходной. В легких и средних условиях работы высота неровностей в начальный период уменьшается на 65...75% [59].

Крагельский И.В. установил, что любая шероховатость после приработки в течение нескольких часов принимает характер «равновесной» [46, 52, 70]. Соответственно продолжительность периода приработки и износ в этот период зависят от того, насколько исходные параметры ПС отличаются от равновесных. При

уменьшении величины начального износа и времени приработки значительно возрастает продолжительность сохранения допустимого эксплуатационного зазора до катастрофического износа. Процесс приработки можно рассматривать как постепенное увеличение опорной поверхности и упругой составляющей деформации контакта, уменьшение доли пластической составляющей, вследствие чего суммарный износ снижается [82].

Процесс приработки можно оценивать параметром относительной опорной длины профиля  $t_p$ . По данным Н.Б. Демкина и И.В. Крагельского [46] начальная часть опорной кривой может быть представлена в виде:

$$t_p = \frac{\sum \Delta l_p}{l} = \frac{A_p}{A_c} = b \left( \frac{a}{R_{\max}} \right)^v \quad (1.2)$$

где  $t_p$  – параметр относительной опорной длины профиля;

$\sum \Delta l_p$  – суммарная длина сечений выступов на уровне  $p$ ., мм

$l$  – базовая длина профиля, мм;

$A_p$  – площадь сечения выступов на уровне  $p$ ., мм<sup>2</sup>;

$A_c$  – номинальная площадь, мм<sup>2</sup>;

$b$  и  $v$  – коэффициенты степенной аппроксимации опорной кривой (получаются путем соответствующей обработки профилограмм поверхностей);

$a$  – расстояние от линии выступов до уровня сечения, мкм;

$R_{\max}$  – максимальная высота неровностей профиля, мкм.

Для повышения износостойкости трущихся деталей путем уменьшения первичного износа целесообразно создавать поверхности скольжения, шероховатость которых соответствует шероховатости поверхностей приработанных деталей.

Профессор А.Г. Суслов отмечает, что процесс эксплуатации детали можно рассматривать как продолжение технологии ее обработки [102]. Поэтому для повышения долговечности пар трения необходимо максимально уменьшить их приработку при эксплуатации. Этого добиваются финишной обработкой, моделиру-



ющей ускоренный процесс приработки, который представляет собой микрорезание и пластические деформации микронеровностей поверхности [104]. Чем больше исходная шероховатость рабочей поверхности отличается от оптимальной, тем больше будет износ в период приработки, следовательно, тем меньше долговечность пары трения [101]. При меньших значениях шероховатости уменьшается величина начального износа и время приработки [15].

В период приработки показателями качества, обеспечивающими максимальные эксплуатационные показатели поверхности трения, являются параметры шероховатости, а в период установившегося износа определяющими являются показатели физико-механического состояния ПС [120].

Исследования изменения микротвёрдости в процессе приработки [59, 129] показали, что период приработки заканчивается после достижения трущейся поверхностью определенной степени наклепа.

### **1.3. Анализ применяемых технологических процессов для достижения качества рабочих поверхностей деталей**

Повысить эксплуатационные свойства, а соответственно и долговечность деталей в настоящий момент возможно за счет разработки новых ресурсосберегающих методов ВиОУО деталей и выбора оптимальных режимов обработки обеспечивающих заданные значения параметров ПС [3, 21, 29, 52, 69, 86, 102, 109].

Вопросам технологического обеспечения качества поверхности деталей посвящены работы А.П. Бабичева, В.Ф. Безъязычного, А.В. Боярникова, В. И. Бутенко, Р.В. Гурова, О.А. Горленко, Н.Б. Демкина, В.В. Иванова, С.В. Ковалевского, А.Н. Михайлова, Е.Ю. Крупени, Ю.Р. Копылова, А.А. Маталина, А.В. Мицыка, В.В. Надуваева, Э.В. Рыжова, С.В. Сорокина, А.Г.Суслова, А.П. Улашкина, С.С. Хмелёва, О.В.Чудиной, П.И. Ящерицына и др.

Для повышения износостойкости поверхности деталей широко применяют различные методы механической отделочной, упрочняющей и ОУО. Классифика-

ции способов повышения эксплуатационных свойств деталей посвящены работы [30, 35, 66, 85, 92, 98]. В последнее время для повышения износостойкости деталей широко применяют ультразвуковую ОУО [91, 93, 94, 96].

В последнее время разработаны новые технологические процессы финишной обработки, которые позволяют снизить приработочный износ, повысить антифрикционные свойства и уменьшить время приработки пар трения. В основе технологических методов повышения износостойкости лежит явление упрочнения. Технологические методы обработки, повышающие эксплуатационные свойства деталей представлены в таблице 1.3.

Методы ППД не обеспечивают оптимальные триботехнические характеристики обработанной поверхности. Химико-термическая обработка, термическая обработка и ППД не позволяют корректировать технологическую наследственность.

Особое значение в технологических процессах изготовления деталей имеет ОУО, заключающаяся в силовом воздействии на поверхность обрабатываемой детали и применяемая, как правило, на финишных этапах изготовления. ОУО непосредственно определяет эксплуатационные свойства деталей.

Существенными барьерами в технологическом процессе являются термические операции и упрочняющие операции, сопровождающиеся поверхностным упрочнением деталей. Влияние многих отрицательных факторов технологической наследственности при осуществлении упрочняющих воздействий резко ослабевает или вообще не наблюдается [58,110].

Недостатки наиболее распространенных методов ОУО деталей представлены в таблице 1.4.

Математические зависимости параметров шероховатости при разных видах обработки представлены в таблице 1.5.

Энергоёмкость наиболее применяемых видов обработки представлена в таблице 1.6.

Таблица 1.3 - Технологические способы обеспечения качества рабочих поверхностей деталей машин [17, 29, 30, 71, 79]

№	Вид обработки	Разновидности
1	ХТО	Цементация, азотирование, хромирование, нитроцементация, цианирование, сульфидирование, борирование и др.
2	Термическая обработка	Плазменная поверхностная и высокочастотная закалка, поверхностная закалка с нагревом в электролите, лазерное упрочнение, термо-механическая обработка и др.
3	Химическая обработка	Глубокое анодирование, оксидирование, фосфатирование, эпиламирование и др.
4	ППД	Обкатка шариками, роликами, валками, раскатывание, дорнование, накатывание, колибрование, дробеструйная обработка, упрочнение чеканкой, гидрополирование, обработка взрывом, деформирующее протягивание, комбинированная и пневмоимпульсная обработка, центробежная динамическая ППО и др.
5	Виброобработка	Вибронакатывание, вибровыглаживание, ультразвуковая обработка (УЗО), виброабразивная, виброгалтовка и др.
6	Гальванические покрытия	Хромирование, никелирование, железнение, борирование, родирование, серебрение, лужение, свинцевание и покрытие сплавами и др.
7	Способы придания поверхности антифрикционных свойств	Графитирование, микропрофилирование, нанесение покрытий в вакууме, нанесение дисульфида молибдена, фрикционное латунирование и бронзирование, металлизация напылением и др.
8	Нанесение покрытий	Наплавка, напыление; ионная имплантация; физикопаровое, механическое, химикопаровое осаждение; химическое, электрохимическое, горячее погружение; ионная бомбардировка в вакууме; плазменное и денудационное напыление и др.
9	Электромеханическая обработка	Электроабразивная, магнитоимпульсная, электрогидравлическая, ультразвуковая, электроалмазная, электроэрозионная, электроимпульсная и др.
10	ОУО	Магнито-абразивное полирование, турбоабразивная обработка, шлифование, суперфиниширование и др.
11	Упрочнение концентрированными потоками энергии	Электронно-лучевая, плазменная, лазерная, электроискровая, обработка в магнитном поле, вакуумная ионно-плазменная обработка и др.

Таблица 1.4 - Недостатки технологических способов обработки [14, 29, 30, 71, 79]

Метод обработки	Недостаток
ППД	Низкая производительность, быстрый износ оборудования, вероятность перенаклепа.
ТО	Высокая вероятность деформации детали. Окисление и обезуглероживание поверхностного слоя, сложность и энергоёмкость процесса. Низкая производительность, не все металлы поддаются ТО.
ХТО	Экологическая небезопасность, продолжительность процесса большая, энергоёмкость, капиталоемкость, сложность ТП производства.
Обработка в магнитном поле	Ограниченные технологические возможности.
Электрофизическая обработка	Низкая производительность, высокая энергоёмкость процесса.
ОУО	Ограничения по материалу, вероятность шаржирования поверхности частичками абразива.

Таблица 1.5 - Параметры шероховатости при обработке резанием [23, 35, 86 150]

Обработка	Формула
1	2
Точение: чистовое	$R_a = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}}$
тонкое (алмазное)	$R_y = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ; R_a = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}}$ $S_m = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ; t_y = 50 \left( \frac{0,005 R_a p}{R_y} \right)^{\left( \frac{R_y}{R_a} - 1 \right)}$
Шлифование: круглое предварительное и получистовое	$R_a = 0,47 \frac{s_{np}^{0,35} i^{0,29} k^{0,08} j_{cm}^{0,34}}{v_\delta^{0,06} s_{pad}^{0,03} i^{0,024}} ; R_y = 1,08 \frac{s_{np}^{0,16} s_{pad}^{0,03} H^{0,7} K^{0,03}}{v_\delta^{0,18}} \left( \frac{j_{cm}}{10} \right)^{0,24} ;$ $S_m = 0,017 \frac{s_{np}^{0,34} i^{0,04} H^{0,25} K^{0,055}}{v_\delta^{0,22} s_{pad}^{0,15}} \left( \frac{j_{cm}}{10} \right)^{0,13}$
Притирка	$R_a = 0,4 \frac{Ra_{ucx}^{0,36} K^{0,79} v^{0,1}}{a^{0,2} t^{0,27}} ; R_y = 1,13 \frac{Ra_{ucx}^{0,32} K^{0,74} v^{0,06}}{a^{0,11} t^{0,35}} ;$

	$R_p = 0,08 \frac{R_{a\text{ucx}}^{0,22} K^{0,72} v^{0,15} a^{0,06}}{t^{0,15}}; S = 0,069 \frac{v^{0,19}}{K^{0,42} a^{0,07} t^{0,2}}$
1	2
Обкатывание	$R_a(v, b) = k_0 v^{k_1} s^{k_2} p^{k_3} y^{k_4} p^{k_5} P^{k_6} D^{k_7} s^{k_8} v^{k_9}$
Сверление	$R_a = 6,36d^{0,25} s^{0,41} v^{0,12}; R_p = 52,4 \frac{d^{0,17} s^{0,52}}{v^{0,14}}; R_z = 48,7 \frac{d^{0,17} s^{0,46}}{v^{0,04}};$ $R_a = 61,3d^{0,17} s^{0,46} v^{0,02}; S_m = 233,9d^{0,23} s^{0,62} v^{0,32}$
Шлифование чистовое	$R_a = 92,5 \frac{s_{np}^{0,39} s_{pad}^{0,05} i^{0,012} K^{0,06}}{v^{0,23} H^{0,04} i^{0,98}}; R_s = 766 \frac{s_{cm}^{0,28} s_{pad}^{0,11}}{v^{0,16} i^{0,06} H^{0,53} K^{0,08} j_{cm}^{1,16}};$ $S_m = 0,02 \frac{v^{0,27} s_{pad}^{0,08} i^{0,29} H^{0,19} K^{0,62}}{s_{np}^{0,02} j_{cm}^{0,33}}$
Торцовое фрезеро- вание чистовое	$R_a = 4,83 \frac{s_z^{1,69} t^{0,15}}{v^{1,23} \rho^{0,14} y^{0,46}}; R_p = 87,3 \frac{s_z^{1,15}}{v^{1,27} \rho^{0,24} y^{0,62}}$
Вибронакатывание	$R_a = k_0 \frac{R_{a\text{ucx}}^{k_1} s_{np}^{k_3}}{\rho^{k_2} i^{k_4}}; R_p = k_0 \frac{R_{p\text{ucx}}^{k_1} s_{np}^{k_3}}{\rho^{k_3} i^{k_4}}$

Таблица 1.6 - Энергоёмкость распространённых видов обработки

Вид обработки	Энергоёмкость (удельный расход энергии)
УЗО (сверление)	50 ... 75 Дж/мм <sup>3</sup> [150]
Электрохимическое растворение	3,85 кВт·ч/кг [12]
Шлифование	2 кВт·ч/кг [95, 102, 111, 114]
Строгание, сверление и фрезеро- вание	0,20-0,25 кВт·ч/кг [95, 102, 111, 114]
Точение	0,045 кВт·ч/кг; 30-50 10 <sup>3</sup> степени Дж/мм <sup>3</sup> куб [95, 102, 111, 114]
Электролитно-плазменное поли- рование	10 Вт/см <sup>2</sup> [80]
Диффузионное упрочнение	1,5- 2 кВт · час [3]
Электрохимическая полировка	50 кВт·ч/м <sup>2</sup> [3, 80]
Алмазное сверление	2000 Дж/мм <sup>3</sup> [110, 114]

#### **1.4. Анализ преимуществ и особенностей вибрационных методов обработки**

Среди вибрационных методов перспективной является УЗО [4, 5, 10, 75, 76, 77]. Суть обработки заключается в придании вынужденных колебаний детали. Колебательные силы, воздействующие на металл, ведут к увеличению плотности дефектов кристаллической решетки (дислокационное упрочнение). Установлено, что ультразвуковое упрочнение более устойчиво к ползучести [107]. Субструктура, полученная ультразвуковым упрочнением, обладает меньшей накопленной энергией, т.е. она является более равновесной, чем структура, получаемая при обычной деформации.

Основам теории и практики методов УЗО и их влияния на износостойкость посвящены работы исследователей Олейника Н.В., Рыжова Э.В., Гурьева Г.В., Дрозда М.С., Папшева Д.Д., Браславского В.М. и других.

Большой вклад в развитие ОУО ППД внесли: Алексеев П.Г., Бабичев А.П., Балтер М.А., Белов В.А., Блюменштейн В.Ю., Браславский В.М., Горленко О.А., Гуров Р.В., Кравченко Б.А., Кудрявцев И.В., Одинцов Л.Г., Папшев Д.Д., Розенберг О.А., Смелянский В.М., Суслов А.Г. и др. Их исследованиями доказано, что повышение эксплуатационных свойств деталей достигается упрочнением поверхностного слоя и образования в нем благоприятных начальных технологических остаточных напряжений.

Метод ОУО ППД является альтернативой процессам абразивной обработки в качестве финишных операций. Преимуществом методов ППД является их экологичность, так как по определению при упрочняющей обработке не происходит удаления материала и, следовательно, повышается коэффициент его использования [80, 81]. Классификация методов ОУО ППД представлена в таблице 1.7.

Для способов вибрационной резонансной обработки в основном применяют частоту колебаний в низшем ультразвуковом диапазоне от 18 до 30 кГц. Вибрационная обработка одновременно действует на напряжения первого, второго и третьего рода.

Таблица 1.7 - Классификация методов ОУО ППД [8, 14, 29, 30, 42, 51, 76]

Методы обработки	Вид обработки
Статические	Обкатывание, раскатывание, выглаживание, дорнование, зубообкатывание.
Динамические	Дробеструйный, вибрационный, пневмодинамический, ротационный, виброконтактный и ультразвуковой наклеп, виброобкатывание, вибровыглаживание; гидродинамическая обработка.

Обработка (ППД) включает в себя большое число технологических методов. Гуров Р.В. предложил классифицировать ОУО ППД на отделочную, отделочно-упрочняющую и упрочняющую обработку (рисунок 1,5) [24, 118].

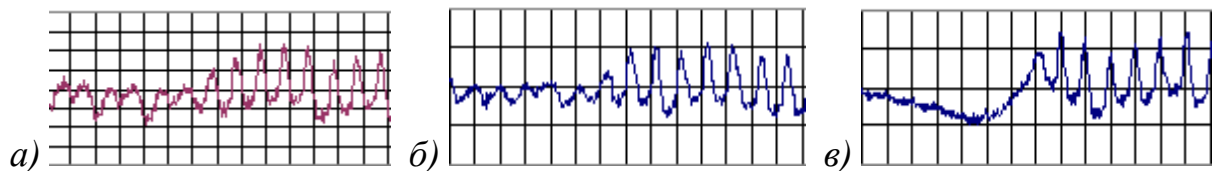


Рисунок 1.5 - Профиль поверхности детали после обработки: а) отделочной; б) отделочно-упрочняющей; в) упрочняющей.

Обработка ППД на отделочных режимах (рисунок 1.5а) выполняется для уменьшения исходной шероховатости поверхности, увеличения ее несущей способности, что позволяет повысить износостойкость, контактную жесткость и коррозионную стойкость поверхности детали. ОУО ППД (рисунок 1.5б) осуществляется с целью уменьшения исходной шероховатости поверхности, увеличения ее несущей способности и частичного упрочнения ПС детали. Упрочняющая обработка ППД (рисунок 1,5в) выполняется с целью формирования регулярного профиля и упрочнения поверхностного слоя детали.

Виброобработка может выполняться на различных режимах (рисунок 1.6.)

Вибрационная обработка одновременно действует на напряжения первого, второго и третьего рода.

Учитывая существующую взаимосвязь функционального назначения рабочих поверхностей деталей машин с их шероховатостью можно выбрать вид ОУО ППД для обеспечения различных эксплуатационных свойств.

ОУО ППД обеспечивает уменьшение шероховатости и улучшение опорных характеристик профиля, и упрочнение ПС на определенную глубину с созданием сжимающих остаточных напряжений в нём.

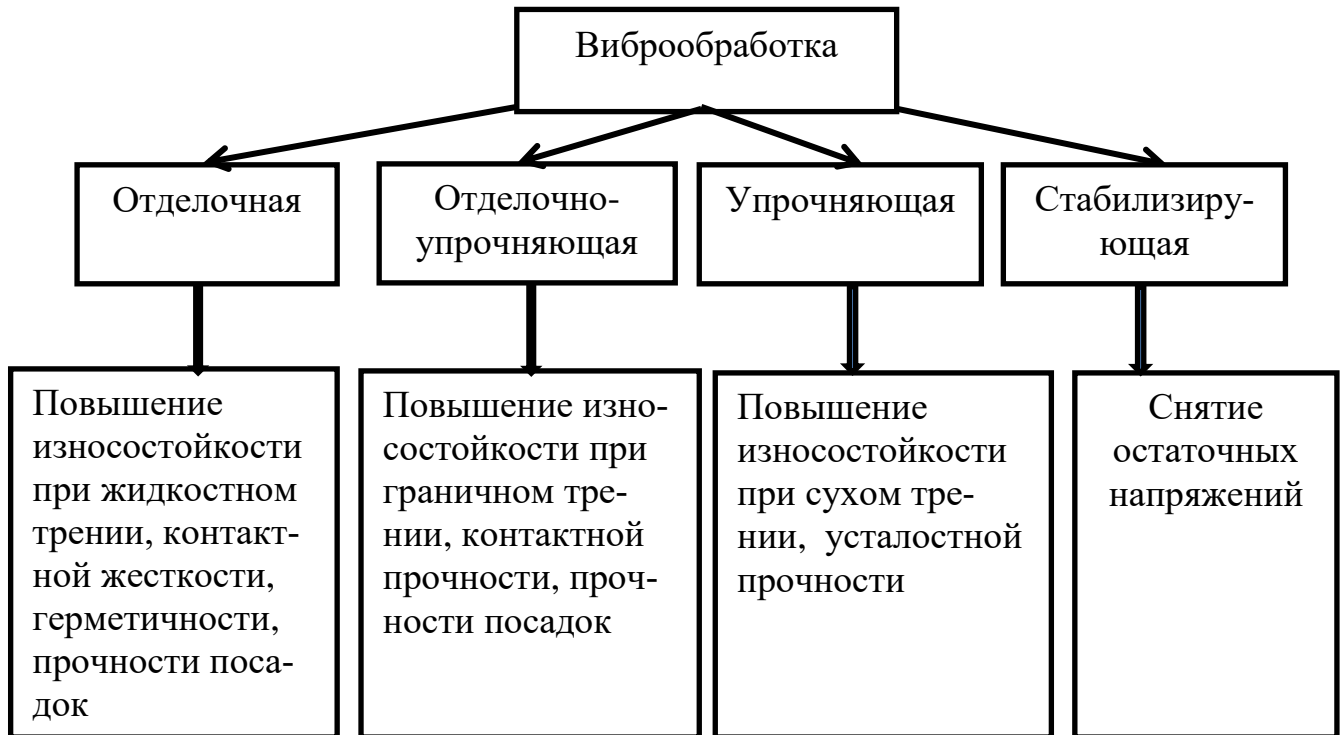


Рисунок 1.6 - Технические результаты виброобработки

Отделочная обработка ППД выполняется с целью уменьшения исходной шероховатости поверхности и увеличения ее несущей способности, т.е. увеличения относительной опорной длины профиля  $t_p$  или уменьшения высоты сглаживания профиля шероховатости  $R_p$ , практически без упрочнения ПС детали. Это необходимо для повышения износостойкости детали при жидкостном трении, контактной жесткости, герметичности и коррозионной стойкости.

Т.к. при УЗО происходит снятие выступов от предыдущей обработки, образуются наклепанный слой, возникают остаточные напряжения сжатия. Физико-механические характеристики поверхностного слоя при УЗО лучше по сравнению



с другими методами ППД [107]. УЗО создает на обрабатываемой поверхности упрочняющий слой с повышенной сопротивляемостью к образованию трещин; улучшает структуру металла и стабилизирует ее.

В последние годы появляется большое количество работ, посвященных изучению технологии УЗО. Среди них работы Ю.М. Боровина, Н.П. Коломееца, Ю.В.Никитина, З.В. Степчевой и ряда других авторов. Недостатком указанных работ является отсутствие внимания вопросам повышения долговечности поверхности деталей.

УЗО обеспечивает получение заданных свойств ПС - частично или полностью регулярного микрорельефа, создание остаточных напряжений сжатия в ПС обработанных поверхностей. Эффективность УЗО определяется главным образом технологическим методом обработки и ее режимами.

Узловым моментом при оптимизации УЗО является выбор или создания такого метода, который не только повысит эксплуатационную долговечность и надежность деталей машин, но и являлся бы энергосберегающим.

Недостатки существующих методов УЗО: длительность процесса, применение дорогих ультразвуковых генераторов, не происходит снижения шероховатости и вытекающего из этого повышения усталостной прочности.

Если исключить эти недостатки можно получить перспективный ТП.

Для комплекса требований (повышение твердости, повышение износостойкости, повышение усталостной прочности, снижение шероховатости, экологическая безопасность) повышающих надежность и долговечность деталей исходя из характеристик обработки - наиболее оптимальной является виброобработка.

Высокая производительность, низкая себестоимость и широкие технологические возможности относят виброобработку к числу наиболее перспективных технологий отделочно-зачистной и упрочняющей обработки [9].

В процессах, основанных или использующих вибрационное воздействие, энергия колебаний сообщается порциями (квантами) [9, 10, 8].

Начальные показатели качества деталей машин на различных масштабных уровнях в процессе эксплуатации изменяются [130, 33, 111]. Исключение состав-

ляют остаточные напряжения и структура основного материала.

Шпиндельная виброотделка является разновидностью безразмерной отделочной виброобработки. Процесс шпиндельной виброотделки деталей осуществляется путем закрепления их на шпинделе, погружением в шлифовальный материал контейнера виброустановки и сообщении им вращательного или поступательного движения (рисунок 1.6) [9, 8, 16, 64, 74].

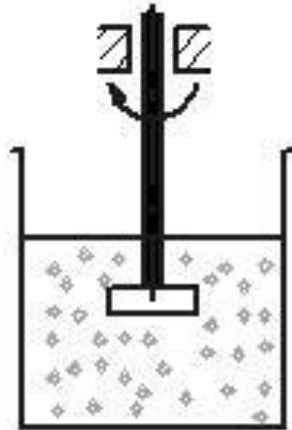


Рисунок 1.7 - Схема шпиндельной обработки

Технологические показатели вибрационных методов обработки представлены в таблице 1.8.

### 1.5 Теоретические предпосылки для разработки АООКУС

При выборе технологий ОУО нужно обеспечить шероховатость, приближенную к равновесной. Важно выбрать предварительную обработку. По получаемым параметрам шероховатости выбирается способ абразивной обработки. Чтобы исключить недостатки обработки резанием оптимально применять в качестве отделочных операций УЗО [57].

Остаточные сжимающие напряжения в ПС повышают предел выносливости, а растягивающие понижают [6, 7]. Уменьшить остаточные напряжения в деталях можно механическими колебаниями в диапазоне ультразвуковых частот контактным способом или через жидкую среду при комнатной температуре. В работах [55, 77] установлено, что обработка ультразвуковыми колебаниями металла

способствует уменьшению уровня внутренних напряжения. Основное влияние на механические свойства ПС и выносливость деталей оказывают остаточные напряжения первого рода.

Таблица 1.8 - Технологические параметры и показатели вибрационных методов обработки

Вид обработки	Технологические показатели	Технологические параметры
Виброобработка (вибростабилизация) сварных конструкций	Стабилизации геометрических размеров, остаточных напряжений, экологичность, энерго- и ресурсосбережение	Частота обработки, величина вибрационного усилия, схема, количество и жесткость опор, количество вибраторов и место их установки, наличие и расположение дополнительных масс
Ультразвуковая размерная обработка	Производительность, качество ПС	Твердость и концентрация абразива, частоты и амплитуды колебаний инструмента, статическая нагрузка
ОУО ППД	Качество ПС, производительность, себестоимость	Твердость и концентрация абразива, частоты и амплитуды колебаний инструмента, статическая нагрузка
Шпиндельная виброобработка в абразивной среде	Производительность, универсальность	Уплотнение и зернистость среды, скорость вращения детали, амплитуда и частота колебаний рабочей камеры
Виброобработка деталей в контейнере свободным абразивом	Шероховатость, остаточные напряжения сжатия, степень и глубина наклепа, износостойкость абразивного инструмента, производительность оборудования.	Механо-физико-технологические параметры рабочей среды, геометрическая конфигурация контейнера, механизм вибровозбуждения, амплитуда и частота колебаний, скорость и угол падения потока.

Особое место среди известных методов финишной обработки деталей занимает вибростабилизирующая обработка под воздействием резонансных колеба-

ний. Однако на практике применение этой технологии, несмотря на явные преимущества (энергосбережение, простота реализации) сдерживается, особенно для ответственных деталей машин.

В то же время при вибрационной ОУО в абразивных средах образуется своеобразный микрорельеф поверхности — множество разноориентированных следов обработки. Шероховатость поверхности деталей после такой обработки характеризуется большой однородностью во всех направлениях, сглаженной формой отдельных микронеровностей, отсутствием острых царапин [9, 66] .

Разновидностью виброобработки является финишная отделка средами органического происхождения [54]. Из-за отсутствия абразивной составляющей улучшение качества поверхности обеспечивается в результате разрушения оксидной пленки, образовавшейся на поверхности микронеровности и последующей их микропластической деформации.

Ультразвуковую упрочняющую обработку твердых тел можно осуществлять либо в жидкости, в которой распространяются ультразвуковые колебания, либо с помощью деформирующих тел, колеблющихся с ультразвуковой частотой. Основа всех технологических процессов при работе с жидкими средами - явление акустической кавитации. Явление возникает при возбуждении и распространении в жидкости ультразвуковых механических колебаний, представляющих собой периодически чередующееся сжатие и разрежение частиц среды. Для стабилизации температурного режима и улучшения акустического контакта изделия вместе с концами концентратора и отражателя в процессе обработки помещают в жидкие среды: воду, масло, расплавы солей. Частота колебаний составляет 21 кГц, амплитуда - 30 мкм.

Кинетика ультразвукового упрочнения определяется интенсивностью энергии, вводимой в деталь ультразвуковой волной, температурой обработки, химическим составом обрабатываемого материала.

Размеры элементов колебательной системы рассчитывают таким образом, чтобы система работала в резонансном режиме. Обработка металлов ультразвуком с амплитудами, меньшими пороговых в течение коротких промежутков вре-

мени, не вызывает изменения свойств металла. Обработка ультразвуком с амплитудами, превышающими пороговые, может его упрочнить, или вызвать разупрочнение.

Для эффективной передачи энергии ультразвуковой волны обрабатываемому изделию в большинстве случаев необходимо применение передаточных сред, в качестве которых используются жидкости: вода, масло, спирты и т. д.

Наиболее эффективной, с точки зрения коэффициента использования энергии ультразвуковых колебаний, является схема, предполагающая применение пассивного колебательного звена. Ультразвуковые колебания, проходя по обрабатываемому изделию и пассивному колебательному звену, отразившись от свободного конца последнего, возвращаются в противоположном направлении. Обычно колебательная система рассчитывается таким образом, чтобы фазы отраженной и первоначальной волн совпадали. В этом случае происходит усиление амплитуды колебаний. Такие схемы применяются для обработки изделий, диаметр которых равен или меньше диаметра незакрепленного конца концентратора.

Упрочнение поверхности с помощью ультразвука позволяет сформировать благоприятное распределение остаточных напряжений и микрорельеф ПС. Ультразвуковая финишная обработка в тех случаях, когда не требуется исправления погрешности формы, способна заменить собою процесс шлифования [79].

Кавитационные пузырьки зарождаются преимущественно на поверхности помещенных в жидкость изделий. При захлопывании пузырьков происходит наклеп поверхности деталей. Глубина наклепа, твердость, а, следовательно, и износостойкость наклепанного слоя определяются интенсивностью энергии ультразвуковой волны, физико-механическими свойствами жидкости, в частности, ее вязкостью, восприимчивостью к наклепу обрабатываемых деталей. В отдельных случаях ультразвуковым наклепом в жидкости можно повысить износостойкость деталей в 1,5-1,8 раза [117].

Деформируемые тела могут либо крепиться к волноводу или концентратору УЗК, образуя ультразвуковой инструмент, либо размещаться в контейнерах.

Как правило, применяются низкочастотные колебания (15-100 Гц) и ультра-

звуковые колебания (от 20 кГц). Возможности и область применения колебаний звукового диапазона не выявлены. Редко применяются резонансные колебания. Собственные частоты большинства применяемых деталей машин лежат именно в звуковом диапазоне, что способствует созданию резонанса в интервале 3-6 кГц. Расширение технологических возможностей вибрационной ОУО возможно за счет использования физических эффектов получаемых при различных схемах энергетического воздействия на деталь и среду.

Основные затраты энергии в классических технологиях приходятся на работу пластической деформации.

Среди наиболее эффективных и универсальных методов отделочной обработки поверхностей деталей особое место занимает вибрационная обработка [23]. Виброобработка реализуется с использованием различных технологических сред при колебаниях различного спектра, и позволяет осуществлять совместное воздействие на поверхностный слой детали механической энергии и химических процессов в различном их сочетании [56]. Виброобработка обеспечивает значительную экономию материальных, трудовых и энергетических ресурсов.

На сегодняшний день широко применяется вибрационная обработка свободной абразивной средой. При этом способе обработки детали абразивная среда помещается в колеблющийся резервуар «U-образной» формы. При общем циркуляционном движении происходят процессы микрорезания и упругопластического деформирования, изменяются параметры поверхностного слоя. [99, 78, 120]

Проведенный анализ процессов ППД и УЗО позволяет сделать вывод о перспективности метода АООКУС. Данная обработка оказывается наиболее эффективной в мелкосерийном производстве. Важной задачей является изучение влияния параметров режимов обработки на параметры качества ПС, а именно микротвердость, шероховатость, субшероховатость, остаточные напряжения. Возникает необходимость в разработке математических зависимостей режимов обработки и параметров качества ПС.

Шероховатостью поверхности деталей в процессе АООКУС можно управлять за счет изменения амплитуды и частоты колебаний. Наиболее существенные

изменения шероховатости поверхности деталей происходят при варьировании величиной амплитуды колебаний.

Основой для разработки АООКУС послужили работы А.П. Бабичева, И.О. Кудашевой, С.В. Ковалевского, работы по шпиндельной обработке (табл. 1.9).

Таблица 1.9 - Области базовых исследований для разработки АООКУС

В.В. Иванов	Виброобработка в полимерной рабочей среде
А.П. Бабичев, К.С. Милосердов	Виброшпиндельная обработка в уплотнённой рабочей среде
С.В.Ковалевский	Резонансная виброобработка в среде ПАВ
И.О. Кудашева	Ультразвуковая обработка в среде ПАВ
Е.Ю. Крупеня	Виброобработка в средах органического происхождения
Е.В. Бранспиз, М.А.Калмыков	Виброабразивная обработка деталей на вибрирующем держателе
А.Г. Суслов	Зависимость интенсивности изнашивания от параметров состояния поверхностного слоя $I_h = \frac{2,5\pi\nu^{1/2} \cdot p^{7/6}}{n \cdot \lambda(\nu + 1)t_m^{3/2} (k \cdot \sigma_T)^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1 - \mu^2)(2\pi R_z W_z H_{\max})^{1/3}}{E \cdot S_m}}$
Чудина О.В., Хачатурян В.А.	Влияние ультразвуковой обработки на структуру конструкционных сталей

На долговечность деталей оказывает влияние комплекс параметров качества поверхностного слоя. На ресурс детали существенно влияет изначальная шероховатость, определяющая время и износ приработки. Для повышения износостойкости и других эксплуатационных свойств деталей необходимо добиваться шероховатости максимально приближенной к равновесной, с заданными параметрами  $R_a$ ,  $t_p$  и формы неровностей.

Существующие технологии обеспечения качества ПС не позволяют получить удовлетворительного сочетания заданных эксплуатационных характеристик узлов трения с приемлемыми технологичностью, энергозатратами, экологической

безопасностью и экономичностью процессов изготовления деталей.

В свете анализа существующих методов ОУО видна необходимость усовершенствования существующих и разработки новых методов виброобработки. Несовершенство современных технологий и оборудования для ОУО технологических процессов изготовления деталей выдвигает потребность в разработке и исследовании новых высокоэффективных и продуктивных технологий, ориентированных на использование вибраций, а также необходимость создания способного реализовать эти процессы оборудования.

С целью ресурсо- и энергосбережения перспективным является АООКУС. В связи с вышеизложенным, поставленная цель диссертационного исследования является актуальной.

## **1.6. Структурная схема работы**

Структурная схема работы отражает основные этапы и пути решения задачи создания технологического обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин на основе акустической отделочно-упрочняющей обработки в квазиупругих средах (рисунок 2.15).

На основании принятых схем технологических воздействий для групп функциональных элементов составляются общие маршруты обработки ЗК, позволяющие формировать основные операции ФО технологического процесса.

На следующем этапе производится реализация разработанного ФО технологического процесса. В процессе реализации ТП производится контроль основных параметров качества и эксплуатационных свойств участков ЗК. В рамках данной работы производились исследования физико-механических свойств поверхностного слоя по параметрам микротвердости и толщины поверхностного слоя с покрытием, а также шероховатости рабочих поверхностей на этапах их подготовки к нанесению покрытий.

По результатам работы выполняется разработка рекомендаций по внедрению АООКУС.



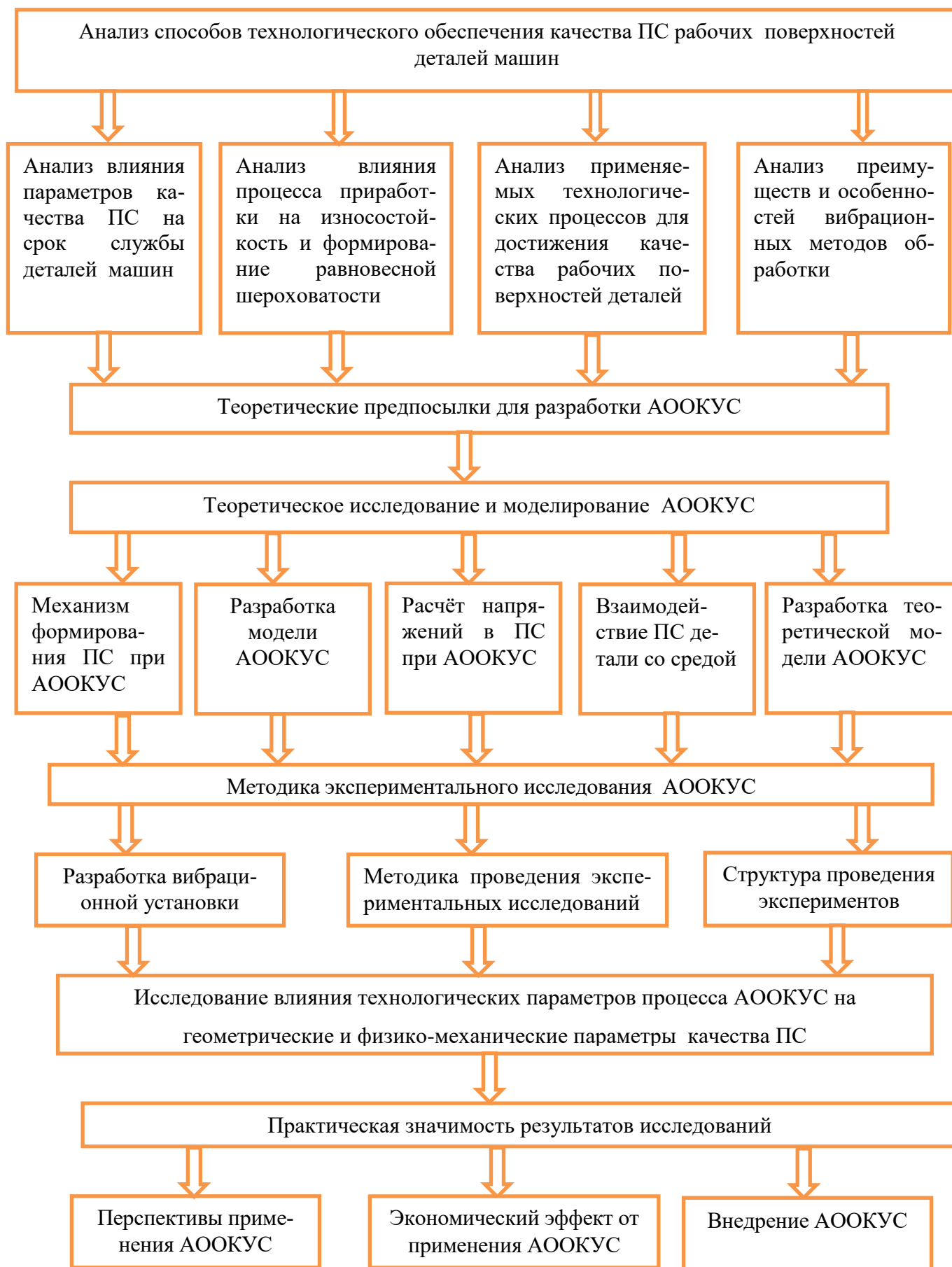


Рисунок 1.8 – Структурная схема работы

## Выводы по первому разделу

Основной задачей исследований является повышение износостойкости деталей пар трения, за счёт формирования качества ПС, обеспечивающего рациональную маслосъемкость, шероховатость и микротвердость.

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 ОУО 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.

Решению данных задач и посвящена диссертационная работа.

## РАЗДЕЛ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АООКУС

### 2.1. Технологический процесс АООКУС

Технологическое обеспечение качества поверхности сводится к выбору метода обработки и расчету режимов обработки, обеспечивающих получение заданных параметров ПС. Качество ПС и износостойкость являются определяющими для финишной ОУО.

При отделочно-упрочняющих операциях для обеспечения качества поверхности достаточно повлиять на микротвёрдость  $HV$  и параметры шероховатости - среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ , средний шаг неровностей  $S_m$ , относительную опорную длину профиля  $t_p$ . Формирование остальных показателей качества ПС (волнистость, макроотклонения, структура, некоторые параметры шероховатости) осуществляется на предварительных операциях технологического процесса.

АООКУС относится к ОУО без снятия припуска металла. Поэтому для достижения заданного качества ПС и точных размеров детали ему должен предшествовать один из видов размерной обработки резанием. Сущность АООКУС состоит в действии механических резонансных колебаний звукового частотного диапазона на деталь, погруженную в квазиупругую среду.

Операционная последовательность технологического процесса формирования ПС при АООКУС следующая:

1. Звуковой генератор формирует короткие импульсы звукового частотного диапазона 727-8000 Гц, которые подаются на ЗКС.

2. От ЗКС заготовке передаются механические вынужденные резонансные колебания, вызывающие вибрацию детали с амплитудой до 100 мкм. Полное использование вынужденного импульсного сигнала обеспечивает жесткое соединение детали с концентратором пьезопреобразователя.

3. Электрический сигнал с установленного на заготовке вибродатчика перемещений усиливается усилителем генератора и подается на входы измерительной аппаратуры.

4. В момент возникновения резонанса в системе генератор - деталь происходит резкое и максимальное отклонения стрелки микроамперметра, который фиксируется системой управления на базе ПК. Поддержание наибольшей амплитуды колебаний осуществляется в ручном режиме с помощью датчика точной настройки.

5. Основным регулируемым режимом обработки является длительность процесса.

Основными технологическими параметрами АООКУС являются:

– амплитуда колебательных смещений, зависящая от параметров ЗКС, в диапазоне от 30 мкм до 80 мкм;

– длительность обработки, в интервале от 10 до 20 минут.

В соответствии с существующей классификацией АООКУС относится к классу ВиОУО и является комбинированным динамическим механохимическим методом. По технологическому назначению АООКУС относится к безразмерным методам обработки; по виду применяемого обрабатывающего инструмента - к группе методов обработки технологическим ППД.

АООКУС характеризуется следующими явлениями:

- динамическим воздействием технологической жидкости, выражаемым квазиупругой силой;

- механическим взаимодействием среды и материала детали в виде вязкого трения;

- старением (вибростабилизацией напряжений);

- кавитационными процессами.

Процесс АООКУС представляет собой сложный комплекс механо-физико-химических явлений, оказывающих существенное влияние на состояние ПС обрабатываемой поверхности детали.

Обработка, используемая для достижения упрочняющего и стабилизирующего эффекта, осуществляется в среде квазиупругих жидкостей. Получение технологического эффекта предопределяются состоянием обрабатываемой среды и характерными её параметрами. В числе последних рассматриваются: кинематическая вязкость; показатель плотности материала; параметры силовых связей; диссипативные и квазиупругие свойства среды.

Структурная схема АООКУС представлена на рисунке 2.1.

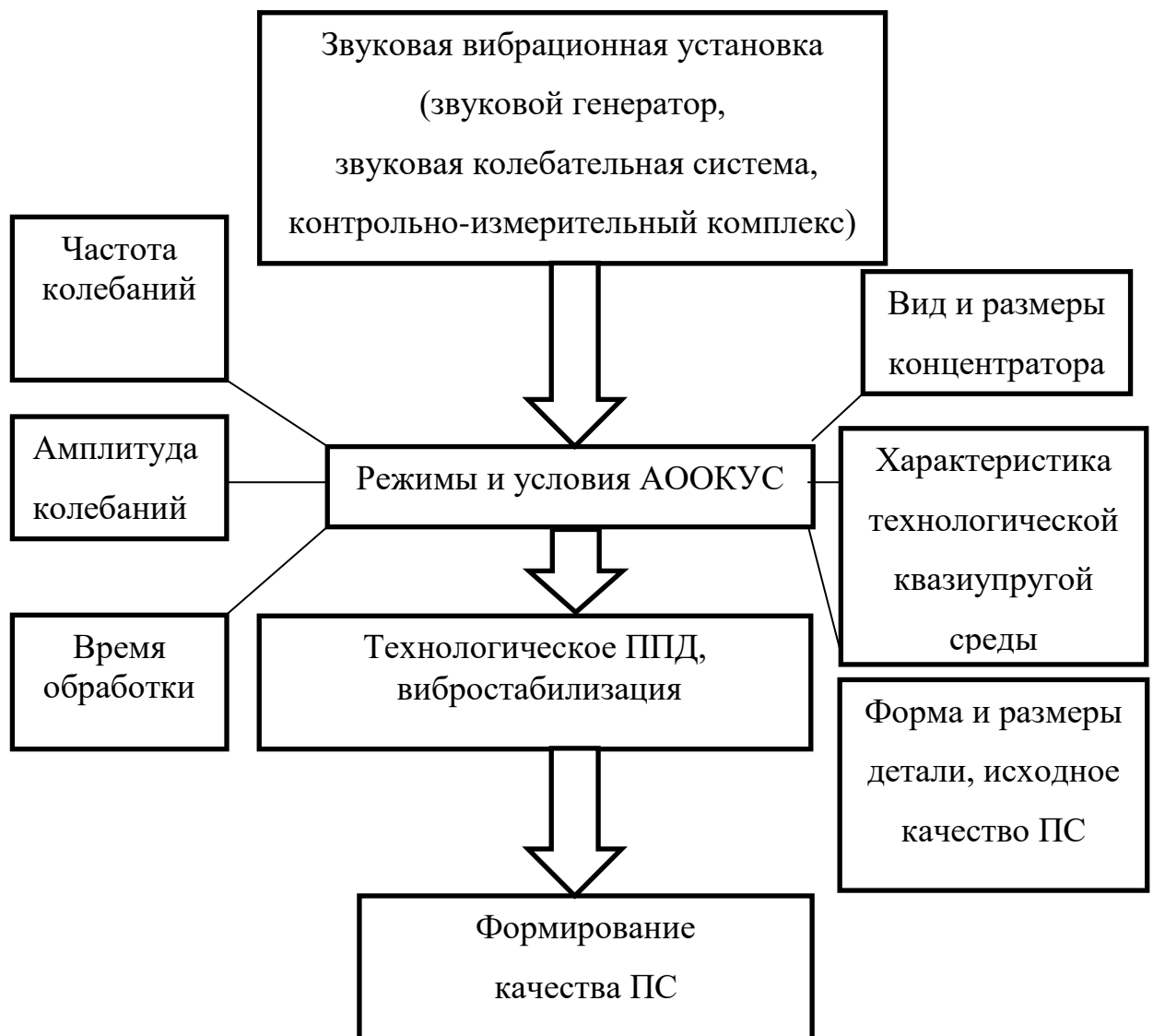


Рисунок 2.1 - Структурная схема процесса АООКУС

Основными параметрами АООКУС являются частота и амплитуда колебаний, длительность обработки. 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.

Формирование качества ПС после АООКУС вызывает изменение механических свойств, что повышает срок службы ответственных деталей.

Особенность метода заключается в том, что технологическая жидкость легко приобретает форму обрабатываемой поверхности, что обеспечивает относительную равномерность ОУО и возможность обрабатывать детали сложной формы.

АООКУС основана на использовании нескольких физических явлений одновременно, 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.

За счёт вибростабилизации АООКУС позволяет достичь равномерного распределения дислокаций и внутреннего напряжения ПС.

Главные отличия предложенного способа:

- передача вынужденных колебаний самой детали, а не среде, что позволяет уменьшить затраты энергии на осуществление процесса обработки;

- отсутствие в рабочей среде твердых рабочих частиц;

- использование явления резонанса на протяжении всего процесса обработки при регулировании частоты колебаний детали.

Основные параметры обработки, которые нуждаются в изучении, следующие:

- состав и вязкость рабочей среды;
- амплитуда и частота колебаний, определяющие энергию взаимодействия атомов рабочей среды с обрабатываемой поверхностью;
- продолжительность процесса обработки;
- конструкция инструмента – концентратора.

В режиме резонанса значения амплитуды колебаний максимальные. При этом извне тратится минимум энергии в поддержку резонанса, а в систему поступает максимум из направленной энергии. Шероховатость и кристаллическая структура поверхности регулируется соответствующими режимами обработки. Обработка в упругой среде позволяет одновременно обрабатывать все поверхности деталей, на разработанной установке можно обрабатывать детали сложной геометрической формы при минимальном энергопотреблении, высокой производительности, экологичности.

При обработке создаются условия взаимодействия детали с окружающей средой приближенные к условиям эксплуатации. Процесс представляет собой обработку ППД при колебаниях детали в технологической жидкости. Теоретическая модель АООКУС представляет собой зависимость определяющая силу сопротивления перемещению детали в технологической жидкости. Взаимодействие ПС с пограничным слоем технологической жидкости определяет пластическую деформацию. Воздействие тела на рабочую среду определяет сопротивление среды, т.е. отбирает импульс у тела.

Действующую на тело силу можно разложить на силу лобового сопротивления, направленную в сторону, противоположную движению тела, и силу бокового трения, перпендикулярную к этому направлению.

Так как рабочая среда неподвижна, возвратно-поступательное перемещение тела не оказывает влияния на удаленные слои жидкости. Взаимодействие происходит только с граничным слоем технологической жидкости, непосредственно соприкасающимся с телом.

Схема технологического обеспечения качества поверхности при АООКУС представлена на рисунке 2.2

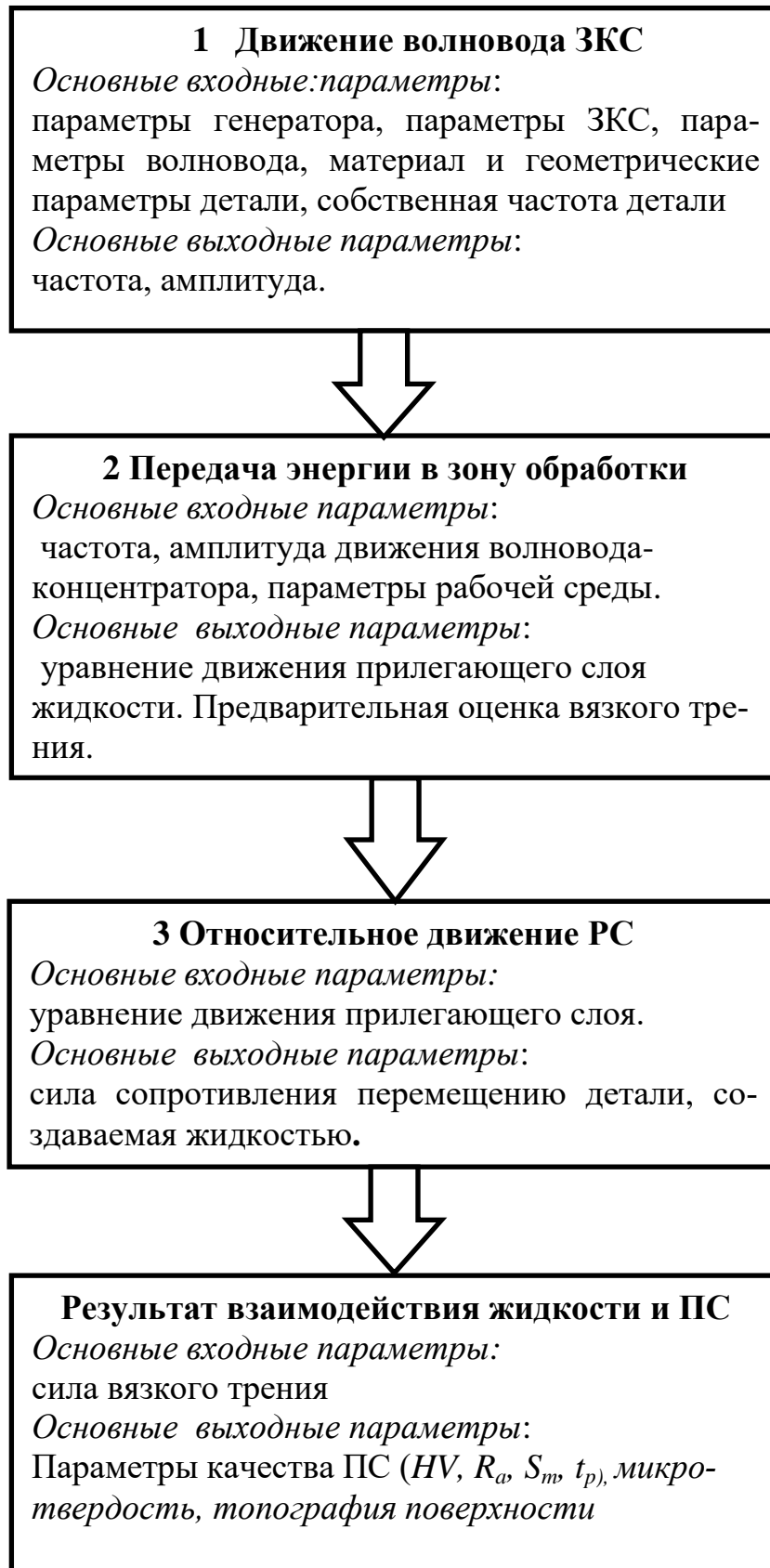


Рисунок 2.2 - Схема достижения качества ПС



## 2.2. Механизм формирования ПС при АООКУС

АООКУС заключается в придании детали вынужденных колебаний вызывающих резонанс в звуковом частотном диапазоне и, как следствие, силовом взаимодействии 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 подобный поверхностно-пластической деформации (ППД) (рисунок 2.3).

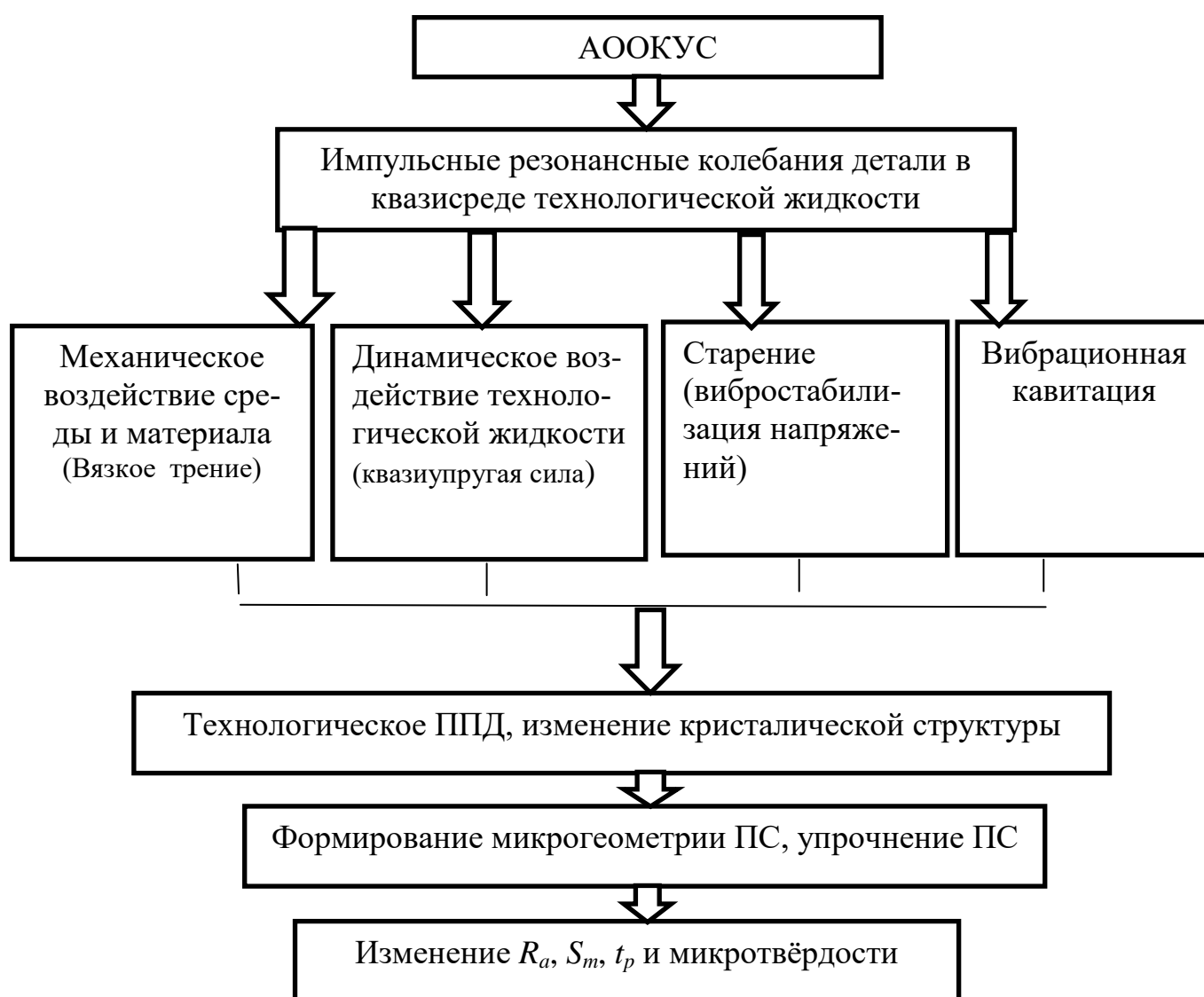


Рисунок 2.3 - Модель формирования ПС при АООКУС

Формообразующие напряжения в ПС возникают под влиянием силы вязкого трения, квазиупругой силы и кавитационных процессов. Сила, действующая на тело, совершающее вынужденные колебания в квазиупругой среде:

$$\begin{aligned}
 F &= F_{mp} + F_{кв} + F_{кав}, \\
 F_{mp} &= -k_1 V, \\
 F_{кв} &= -k_2 A,
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

где  $k_1$  – коэффициент сопротивления среды, зависит от вязкости среды  $\eta$  и площади соприкасающихся поверхностей  $S$ :  $k \sim \eta S$ ;  $V$  – скорость заготовки;  $k_2$  – коэффициент квазиупругой силы,  $A$  – амплитуда; знак минус указывает на противоположное направление вектора силы и смещения.

Формируемая в процессе операций финишной обработки микрогеометрия ПС в значительной степени определяет долговечность деталей. В некоторых случаях необходимо улучшить качество уже сформированного ПС. Для этого применяются способы ОУО специальными обрабатывающими средами, например квазиупругими. Применение в качестве обрабатывающей среды технологической жидкости позволяет повысить производительность.

Задачей данной работы является обоснование эффективности акустической отделочно-упрочняющей обработки в квазиупругих средах.

В процессе колебаний детали в поверхностном слое возникают напряжения, которые вызывают пластическую деформацию, усиливаемые в результате взаимодействия с окружающей средой. Деталь в процессе колебаний влияет на частицы среды, которые прилегают к поверхности. Моделируется процесс эксплуатации. В результате взаимодействия с деталью, в рабочей среде возникают упругие силы.

При взаимодействии с рабочей средой профиль ПС детали пластично деформируется. За счет уменьшения высотных параметров и увеличения шаговых параметров шероховатости, скругления радиусов вершин и увеличения опорной площади, микрогеометрия поверхности приближается к равновесному (эксплуа-

тационному) состоянию.

В процессе колебаний в ПС детали возникают благоприятные остаточные напряжения сжатия, усиливаемые за счет взаимодействия с квазиупругой средой и способствующие повышению усталостной прочности и износоустойчивости детали.

АООКУС как комбинированный способ включает вибростабилизирующую обработку и ОУО. При отсутствии абразивной составляющей рабочей среды при обработке оксидная пленка поверхности не разрушается, происходят микропластические деформации.

В основе формирования ПС при АООКУС лежит комбинация трёх процессов: 1) механизм кавитационной эрозии, 2) вязкое трение; 3) действие квазиупругой среды.

При обработке деталей в квазиупругой среде на их поверхностях возникают знакопеременные напряжения растяжения и сжатия. Данные напряжения приводят к образованию и захлопыванию кавитационных пузырьков, что соответственно вызывает кавитационную эрозию. Диапазон колебаний (средняя частота срыва каверн), при которых возможен процесс кавитационного изнашивания, лежит в пределах от 5 до 10 кГц. Наиболее интенсивные тональные составляющие колебаний лежат в частотном диапазоне от 800 до 8000 Гц [136]. Частота соударения микроструй технологической жидкости при образовании кавитационной каверны достигает тысяч герц. При этом силы, вызывающие кавитацию, представляют собой высокочастотные колебания давления с большой амплитудой. При вибрационной обработке в квазиупругой среде поверхность детали создаёт волны давления звукового диапазона с амплитудой 40-100 мкм. ПС слой формируется под действием периодических соударений порядка  $10^{8-10}$  МПа?????? микрокапель рабочей среды. Схема кавитационного разрушения включает три этапа: упрочнение материала - изменение рельефа поверхностных слоев - отделение частиц материала с поверхности взаимодействия технологической жидкости и рабочей поверхности детали. При АООКУС используются первые два этапа, третий этап исключается.

Процесс АООКУС включает две стадии процесса: - инкубационный период, при котором каких либо изменений геометрических и физикомеханических параметров ПС не фиксируются; - период деформационного упрочнения и формирование регулярного микрорельефа приближенного к равновесному. Период разупрочнения и разрушения ПС свойственный методам ультразвуковой ОУО и методам обработки в жидких средах при АООКУС не осуществляется в связи с ограниченными напряжениями в ПС.

Формирование микрорельефа поверхности обрабатываемой детали происходит при взаимодействии детали и технологической жидкости, вызванном действием направленных вибраций, сообщаемых детали. При этом, за определенный промежуток времени, происходит постепенное изменение параметров ПС ( $R_a$ ,  $R_v$ ,  $S$ ,  $S_m$ ) и скругление вершин микронеровностей.

По результатам предварительных исследований влияния процесса АООКУС на качество ПС выявлено снижение высоты микронеровностей на 0,2-0,3 мкм в зависимости от марки материала образцов. Особенность ОУО деталей в квазиупругих технологических жидкостях заключается в обеспечении микропластической деформации микронеровностей поверхности детали. ОУО обработка влияет на шероховатость и микротвердость обрабатываемой поверхности. На наружной поверхности детали при АООКУС увеличиваются сжимающие напряжения.

При АООКУС происходит взаимное соударение и скольжение поверхности с технологической жидкостью. При кратковременных ударных условиях нагружения квазиупругая среда приобретает свойства твердого тела. Рабочую среду рассматриваем как однородное тело. Сопротивление среды определяется её вязкостью. В результате многократного воздействия за счет сопротивления перемещению рабочей среды и обрабатываемой поверхности формируется микрорельеф, образуется наклеп и снимаются остаточные напряжения.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности применения для финишной обработки поверхностей деталей пар трения АООКУС рабочих сред с различными наполнителями (вода, растворы ПАВ, масло индустриальное). Применение звуковых резонансных колебаний и различных рабочих квазиупру-

гих сред позволяет расширить номенклатуру способов финишной обработки (отделки) деталей. Поэтому задачей настоящих исследований являлось обоснование эффективности виброотделки деталей АООКУС, в частности в индустриальном масле с наполнителем, зависящим от материала образцов.

Основными показателями АООКУС являются: определенные параметры шероховатости, микротвердость и остаточные напряжения. В результате соударений рабочей поверхности с рабочей средой происходит скругление гребешков микронеровностей. Под производительностью АООКУС понимается интенсивность достижения заданных параметров в результате микросглаживания.

Рассчитывая удельную величину микродеформации за один энергоимпульс, зависимость [2, 12] для оценки изменения шероховатости в процессе АООКУС можно записать так:

$$\delta = K_{Ra} \cdot K_{cp} \cdot K_{Sm} \sqrt{\frac{\cdot \mathcal{E}}{\cdot HV}}, \quad (2.2)$$

где:  $\delta$  - удельная величина микродеформации за один энергоимпульс,  $K_{cp}$  – коэффициент, учитывающий изменение свойств технологической жидкости;  $K_{Ra}$   $K_{Sm}$  – коэффициент, учитывающий геометрические размеры исходного микропрофиля обрабатываемой поверхности;  $\mathcal{E}$  – энергия соударения частиц обрабатываемой среды с обрабатываемой поверхностью;  $HV$  – твердость обрабатываемой поверхности.

Как следует из формулы 2.2, в качестве основных факторов, обуславливающих величину микропластической деформации и, как следствие, изменение микропрофиля, выступают, геометрические и физико-механические свойства микронеровностей обрабатываемой поверхности, а также энергия взаимодействия. Совокупность этих факторов в целом раскрывает физическую сущность процесса обработки деталей в квазиупругих средах.

Учитывая, что использование энергии УЗ поля связано с возникновением звукокапиллярного эффекта и релаксацией остаточных напряжений поверхностного слоя металлов, можно предположить возможность влияния УЗК на степень

проявления эффекта Ребиндера в процессах АООКУС. Эффект Ребиндера может проявляться в различной степени и форме – от облегчения пластического деформирования до значительного понижения прочности. Условия обработки при АООКУС позволяют технологической среде облегчить процесс технологического ППД.

### **2.3. Разработка структурно-функциональной модели обеспечения качества ПС при АООКУС**

Качество изделий, производительность и экономические показатели технологических процессов изготовления деталей зависят от режимов ОУО. Необходимы режимы ОУО, позволяющие обеспечить заданное качество ПС (микротвердость, шероховатость, глубину упрочненного слоя и т.д.) при максимальной производительности и минимальных затратах. Выбор параметров АООКУС должен предусматривать возможность быстрой адаптации режимов ОУО к свойствам обрабатываемой детали и условиям производства.

Важным обстоятельством при математическом моделировании ТП АООКУС для обеспечения качества ПС является выбор критериев качества обработки определяющих эксплуатационные характеристики деталей. В качестве данных критериев целесообразно использовать микротвердость, глубину упрочненного слоя и шероховатость ПС.

Комплекс требований при разработке ТП ОУО деталей способом АООКУС представлен на рисунке 2.4.

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. Параметры процесса обработки определяются совокупностью кинематики и физических явлений в зоне обработки. Механика процесса описывает условия взаимодействия технологической жидкости с обрабатываемой поверхностью с учетом упругой и пластической

деформации, трения, квазиупругих сил.

Для АООКУС определяющими являются качество и износостойкость обрабатываемой поверхности.



Рисунок 2.4 – Комплекс требований, обеспечивающих качество ПС при АООКУС

В результате обработки формируется качество поверхности и её эксплуатационные характеристики. Основным параметром, характеризующим протекание процесса обработки является сила, имеющая нормальную и тангенциальную составляющую и определяющая параметры деформируемого слоя.

Модель метода ОУО может быть представлена в виде технологической системы, включающей следующие структурные элементы: внешняя окружающая

среда, внешние и внутренние свойства объекта моделирования.

Для описания метода ОУО используем вербальную структурно-функциональную модель характеризуемую внутренними, внешними свойствами системы и свойствами внешней окружающей среды (условия функционирования). Процесс обработки как объект представлен в виде обобщенной структурной и функциональной схем. Объект управляется, и на него воздействуют разнообразные внешние воздействия и ограничения.

Важнейшим условием осуществления процесса технологического ППД при АООКУС является своевременная регистрация изменений физических свойств обрабатываемой детали происходящих в процессе ОУО. Это позволяет получить заданное качество ПС исходя из технологического процесса изготовления детали. Технология ОУО – это диссипативная управляемая система с обратной связью, позволяющая осуществлять процесс ОУО в режиме «черного ящика». На входе технологические параметры, а на выходе показатели качества.

Математическая модель технологического процесса АООКУС в обобщенном виде может быть представлена в виде совокупности зависимостей, отображающих закономерности, присущие АООКУС:

$$E = f(x_i, y_i) \quad (2.3)$$

где  $E$  - ожидаемая эффективность (целевая функция);  $x_i$ - управляемые переменные (частота, амплитуда, время);  $y_i$  –неуправляемые переменные (химический состав металла, исходная микроструктура ПС, технологическая наследственность).

Разработка алгоритма управления такой модели получается при определении значения  $x_i$  как функции  $y_i$ , приводящего к экстремуму  $E$ .

Протекание технологического процесса определяется параметрами, воздействующими на его входы. Часть из них являются заданными, другие управляющими, третьи представляют собой случайные факторы (рисунок 2.5)



Внешние условия (условия функционирования):  
температура, влажность, квалификация рабочих и тип производства

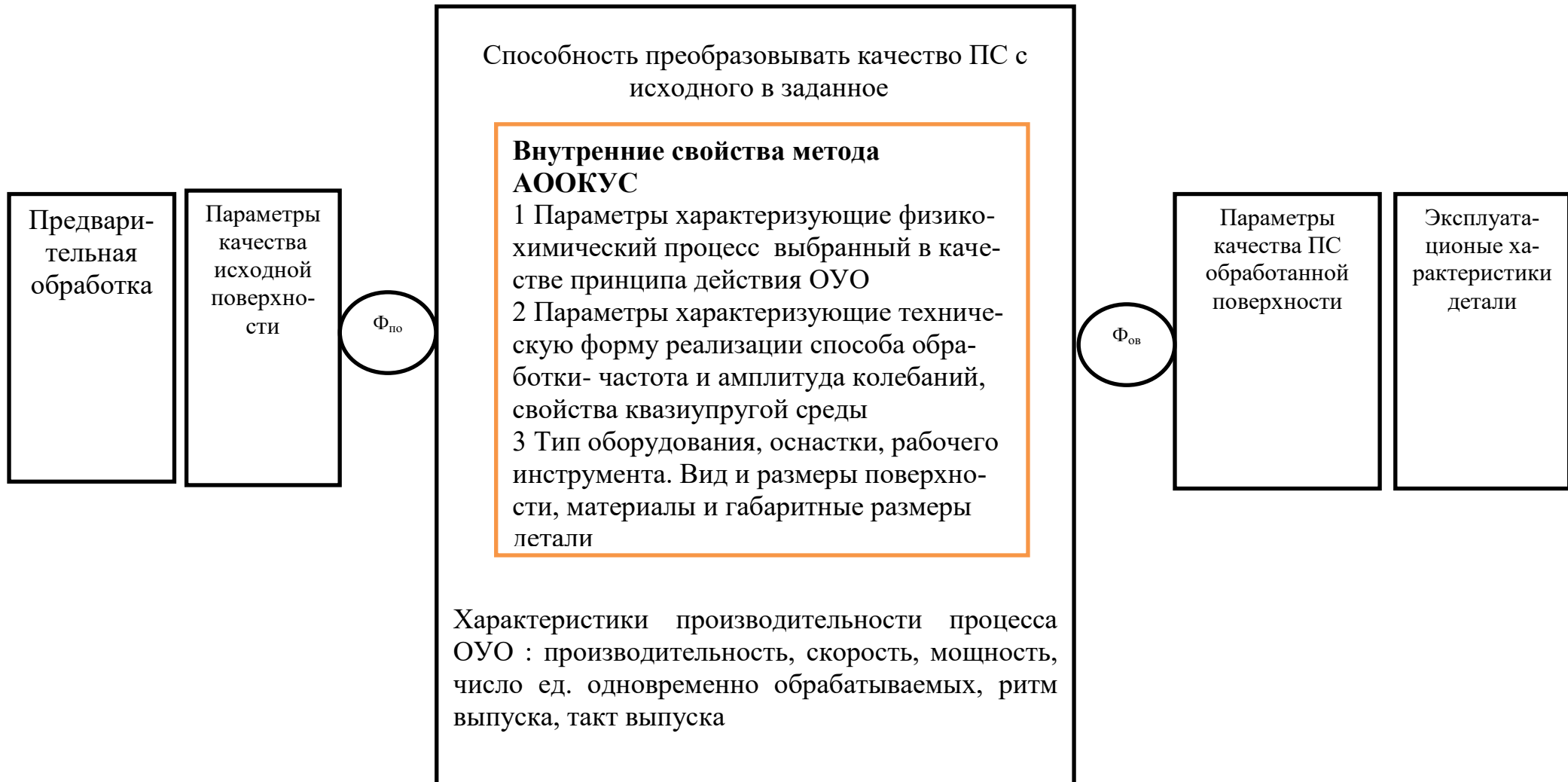


Рисунок 2.5 - Структурно-функциональная модель АООКУС

Таблица 2.1 - 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	ВиУстановка	ВУ	
	Материал и габаритные размеры детали		
	Вид и размеры поверхности		
	Технологическая жидкость	ТЖ Вязкость	
	Техническая форма реализации процесса (режимы обработки)	РО	частота
			Амплитуда время
Принцип действия АООКУС		Вибростабилизация, технологическое ППД	
Выходные	Качество ПС	Микротвёрдость, шероховатость, глубина упрочненного слоя	
	Долговечность	Срок службы	
	Износостойкость	Износ	
Внешние свойства метода	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,	
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 $\Phi_{ов}$		

Заданными параметрами являются: марка металла детали, исходные значения микротвердости и шероховатости, конструктивные параметры детали.

Управляющими параметрами являются амплитуда и частота колебаний,

время обработки, объём контейнера.

Изменением этих параметров в определённых пределах можно обеспечить необходимые значения по показателям глубины упрочненного слоя, микротвёрдости и параметров шероховатости при АООКУС.

К случайным параметрам относятся внешние условия функционирования ТП: температура, влажность окружающей среды, квалификация рабочих, технологическая наследственность, предшествующая обработка поверхностей.

Качество технологической системы определяется выходными параметрами: микротвёрдость, шероховатость ПС, глубина упрочненного слоя, технологическая себестоимость. Один из этих параметров или их сочетание представляет собой показатель качества (функцию цели) проектируемого процесса. Целью формирования процесса АООКУС является приведение показателя качества к экстремуму. Остальные выходные параметры должны поддерживаться в определенных заданных пределах.

Протекание ТП АООКУС происходит в условиях ограничений различной природы: физико-химические и механические свойства материала ПС, дефекты поверхности, технологическая наследственность, геометрические размеры вала.

Процедура выбора режимов обработки представляет собой процесс отыскания рациональных управляющих параметров, обеспечивающих при накладываемых ограничениях достижение поставленной цели (обеспечение требуемой глубины упрочнения, микротвердости, шероховатости ПС).

Обеспечение качества ПС при АООКУС достигается при стремлении каждого из всех параметров к максимуму или минимуму. Следовательно, целевая функция примет вид:

$$F_1 = f(h, HV) - \max, \quad (2.4)$$

$$F_2 = f(Ra) - \min. \quad (2.5)$$

Очевидно, что выходные параметры не могут быть равны нулю. Накладываемые ограничения могут быть выражены функциями в виде:

$$F_1 = f(h, HV, R_a) > 0 \quad (2.6)$$

Управляющие параметры должны иметь пределы значений, обусловленных рекомендациями, конструктивными особенностями оборудования и обеспечивающими эксплуатационную надежность и долговечность. Таким образом, на управляющие параметры тоже накладываются ограничения.

Решение задачи сводится к максимизации функции  $F_1$  и минимизации функции  $F_2$  при всех принятых ограничениях.

Принципиально новым в осуществлении вибрационной ОУО является:

- обработка в резонансном режиме звукового частотного диапазона,
- использование в качестве обрабатывающей среды технологической жидкости.

Основными критериями качества обработки методом АООКУС является микротвердость и шероховатость ПС, а показателем экономической эффективности – технологическая себестоимость обработки детали методом АООКУС.

Под производительностью АООКУС будем понимать интенсивность достижения заданных конечных параметров обрабатываемой поверхности в результате её микросглаживания.

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

$$HV = F_1(A, t) - \max \quad (2.7)$$

$$Ra = F_2(A, t) - \text{равн.} \quad (2.8)$$

$$C - \min \quad (2.9)$$

Качественные показатели обработки определяются амплитудой колебаний и временем обработки. Себестоимость определяется текущими расходами и суммарными значениями основного, вспомогательного и времени технического обслуживания.

Примем комплексный показатель, отображающий качественные и количе-

ственные закономерности, присущие процессу АООКУС:

$$E=F(h, HV, Ra)-max$$

где E-ожидаемая эффективность (целевая функция).

#### **2.4. Взаимодействие ПС детали с квазиупругой средой при АООКУС**

Технологическую жидкость рассматриваем, как вязкую несжимаемую однофазную жидкость и используем метод, используемый в механике однофазных жидкостей.

Толщина приграничного слоя жидкости зависит от вязкости жидкости. Теоретически исследовать вибрационные перемещения детали в технологической жидкости - сложная задача.

Получим математическую модель для процесса вибрационной обработки детали закрепленной на концентраторе ЗКС в неподвижном контейнере, заполненном технологической жидкостью. Обрабатываемые детали колеблются вертикально с амплитудой резонансных колебаний звукового частотного диапазона. Процесс обработки представляет собой технологическое ППД, при колебаниях детали в технологической жидкости (ТЖ). Следовательно, описать данный процесс нужно зависимостью определяющей силу сопротивления колебаниям детали в технологической жидкости. Воздействие приграничного слоя определяет ППД и определяет сопротивление технологической жидкости.

Определим вид зависимости для сопротивления движению тела в ТЖ, соответствующий случаю вертикального проникновения его в этот материал.

Сила сопротивления колебаниям тела в технологической жидкости, обусловленная, как уже отмечалось, отбором импульса у движущегося тела квазиупругой средой, представляет собой сумму «лобового» сопротивления, и «бокового» вязкого трения.

Сила сопротивления колебаниям тела в жидкости представляет собой силу вязкого трения, вызванную трением частиц жидкости о боковую поверхность тела. Согласно механике жидкой среды, если движение тела в среде сопровождается только трением жидкости о боковую поверхность, то общее сопротивление движению тела в среде определяется первой степенью скорости относительного движения тела.

При движении некоторого тела в ТЖ приграничный слой этой жидкости к поверхности тела будет приобретать некоторую скорость (импульс), что в конечном итоге и обуславливает определённую силу сопротивления.

Для определения силы вязкого трения применяют формулу

$$F_c = a_x \rho_{жс} / 2 S_a A f \quad (2.11)$$

где  $a_x$  — коэффициент сопротивления среды;  $\rho_{жс}$  — плотность жидкости,  $S_a$  — площадь поперечного сечения детали,  $A$  — амплитуда колебаний,  $f$  — частота колебаний детали.

Если примем, что деталь в процессе вибрационного воздействия имеет только линейные перемещения в вертикальном и продольном направлениях, а угловые перемещения учитывать не будем, сила жидкостного трения в этом случае определится упрощенной зависимостью:

$$F_c = \mu / h S A f \quad (2.12)$$

где  $\mu$  — вязкость жидкости;  $S$  — площадь поверхности детали, соприкасающейся с лотком;  $h$  — толщина приграничного слоя;  $A$  — амплитуда колебаний,  $f$  — частота колебаний детали.

## **2.5. Диффузионная модель описания процесса упрочнения и отделки ПС технологическим ППД в квазиупругой среде**

При комплексном воздействии при АООКУС в объёме детали возникают

значительные градиенты напряжений. Принцип суперпозиции позволяет выразить общее напряжение в объёме ПС детали, как сумму напряжений, возникающих от увеличения плотности дислокаций, возникающих вследствие диффузионного массопереноса атомов из центра детали к периферии и от силового взаимодействия доменов. Фазовые превращения, происходящие в ПС, связаны с изменением химического потенциала атомов растворенного вещества.

АООКУС это процесс бародиффузии. К нему можно применить закономерности термодинамического описания твердого раствора. Для усиления диффузии и ускорения фазовых превращений необходимо наличие внешних воздействий, обеспечивающих сохранение сплошности тела при проявлении в нём неоднородных объёмных изменений и деформаций, возникающих при увеличении концентрации атомов примеси. При АООКУС происходит процесс Джоуля-Томпсона - первоначальная активация и последующее дросселирование примесей по каналам дислокации.

Для описания процесса гомогенизации воспользуемся моделью Снука. Механизм внутреннего трения очень сложный и многофакторный. Его описание проводят как интегральную диссипацию энергии включений, совершающих дрейф во внешнем поле  $U(X,t)$ , где  $X$ -вектор координаты;  $t$ -время.

Поверхностный эффект Снука - это науглероживание ПС детали в результате восходящей диффузии атомов включений твердого раствора Fe-C. Результирующая концентрация примесей в упрочненном слое будет определяться функцией  $C=f(X,t,N_0)$ , где  $X$ -координата,  $t$ - время,  $N_0$ - начальная концентрация дислокаций.

Связь потенциала поля напряжений  $i$  с силой выражается формулой Снука:

$$i = -\rho D \Delta C + \rho \omega b |F| \quad (2.13)$$

где  $\rho$  - плотность материала,  $D$  - коэффициент диффузии,  $\Delta C$  - градиент концентрации атомов включений в твердом растворе,  $\omega$  - скорость распростране-

ния поля напряжений в металле,  $b$  - вектор Бюргерса,  $F$  - сила взаимодействия дислокаций в поле напряжений т.к.

Решая данное уравнение получим:

$$C = x \exp(-P.r) \quad (2.14)$$

что соответствует термодинамическому описанию деформированного твердого тела.

Характер насыщения ПС обусловлен ограниченностью атомов примесей, способных диффундировать в ПС при АООКУС и переходом части примесей в пластифицированный и аморфизированный слой в результате химической реакции с образованием карбидов металлоидов.

## **2.6. Структурно-энергетический анализ процесса обработки ПС АООКУС**

По современным представлениям [4-8] пластическая деформация ПС является кинетическим процессом, который совершается в форме единичных элементарных актов на микроуровне, а затем проявляется в виде макроскопического эффекта [48].

Исходя из энергетической сущности явлений, протекающих в ПС детали при технологическом ППД во время АООКУС, основным параметром, определяющим структуру и параметры ПС, является плотность потенциальной составляющей внутренней энергии  $E_p$ , накапливаемой в материале ПС.

Согласно современным представлениям скрытая энергия деформации закономерно растет с увеличением степени деформации [32]. При большей скорости деформации больше и скрытая энергия при одинаковых степенях деформации.

Рост микротвердости ПС влияет на эксплуатационные свойства деталей и на процесс упрочнения. Изменение твердости влияет на способность металла накапливать дополнительные повреждения структуры. Упрочненный металл меньше



деформируется при каждом последующем колебании, и через определенное время обработки, при достижении максимально возможной микротвердости, при данных режимах обработки процесс упрочнения ПС.

Микротвердость ПС является основным параметром, который позволяет косвенно определить плотность скрытой энергии.

Основываясь на зависимости, предложенной в [32] уравнение, связывающее энергетический параметр деформации верхнего слоя металла, для АООКУС будет иметь следующий вид:

$$E_{y\partial} = K Af60/2000, \text{ кДж/м}^2 \text{ мин} \quad (2.15)$$

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 727-8000 кГц и амплитуды 50-80 мкм значения  $E_{y\partial}$  будут в пределах 280-300 кДж/м<sup>2</sup> мин.

## 2.7. Кавитационные процессы при АООКУС

Механизм влияния ультразвуковой кавитации на изменение структуры и свойств ПС обрабатываемых поверхностей на сегодняшний момент изучен мало.

В процессе работы ЗКС в звуковом частотном диапазоне в приграничном слое жидкости развиваются кавитационные процессы, сопровождающиеся образованием кумулятивных струй жидкости в результате схлопывания кавитационных пузырьков, формированием ударных волн, генерируемых из зоны схлопывания пузырьков и возникновением коллективной ударной волны. При захлопывании кавитационного пузырька возникает ударная волна, развивающая значительные давления. Многократное воздействие в одной и той же области большого количества отдельных захлопывающихся пузырьков приводит к повышению плот-

ности дислокаций, которое носит накопительный характер. В начале воздействия пузырьков на поверхности преобладают упругие деформации, затем, накапливаясь по величине, деформации становятся пластическими и при повышении критических значений деформации может произойти разрушение металла, которое происходит путем разделения материала на макроскопические части.

При обработке рабочих поверхностей деталей необходимо обеспечить режимы ультразвуковой обработки, которые обеспечили бы максимальный уровень упрочнения конструкционных сталей без нарушения целостности поверхности.

В результате описанного ударного акустического воздействия вблизи поверхности металла формируется масса многократно захлопывающихся пузырьков, которые активируют процессы увеличения микронапряжений в кристаллической решетке, повышения плотности дислокаций и измельчения зерна. Кроме того, авторы работы [6] наблюдали на границах зерен после деформации межфазные дефекты, которые представляют собой межфазные дислокации, решеточные дислокации и субмикропоры, которые также вносят вклад в повышение уровня прочности сталей.

## **2.8. Расчёт напряжений в ПС при АООКУС**

### **2.8.1 Моделирование образца для исследований**

Совпадение частоты вынуждающего воздействия и собственной частоты колебаний в процессе вынужденных колебаний детали характеризуется резким возрастанием амплитуды колебаний. Деталь (система), как правило, имеет несколько резонансных пиков и эффективность каждого из пиков существенно отличается [153]. Наиболее целесообразно вести вибрационную ОУО на резонансных пиках, обеспечивающих наибольшую амплитуду колебаний. Виброобработка в резонансном режиме позволяет создавать высокие вибрационные напряжения при незначительных возмущающих усилиях. Резонанс возникает при совпадении колебаний вынуждающей силы (концентратора) с собственной частотой колеба-

тельной системы (детали). Наибольший интерес вызывает основная (низшая) частота собственных колебаний, которая лежит, как правило, в звуковом диапазоне. При правильно выбранных режимах относительное снижение остаточных напряжений при виброобработке на первой резонансной частоте составляет 40–45 %, на второй – дополнительно 10–12 %, на третьей, четвертой и пятой 5–8 %.

Для расчёта напряженно-деформированного состояния обрабатываемой детали под действием приложенной вынуждающей силы используется статический анализ. Для построения модели, адекватно отражающей физическую сущность и свойства исследуемой детали, применяется метод конечных элементов.

Моделирование «пальца» было выполнено в САЕ – пакете COSMOS 2M ver 2.7. При моделировании конструкция детали – палец шарнирный (рисунок 2.6) упрощена, убраны фаски и представлена в виде цилиндра постоянного диаметра.

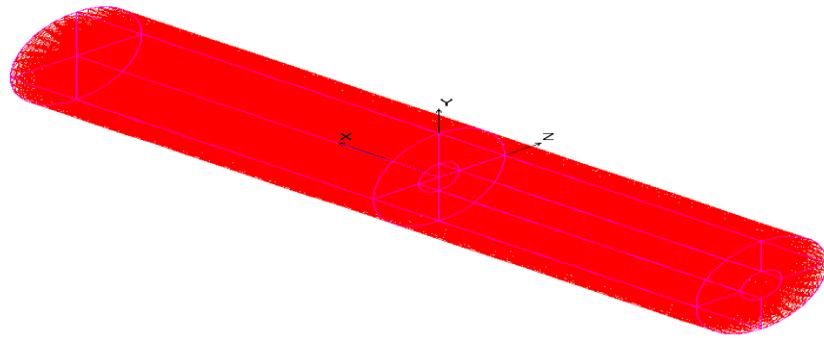


Рисунок 2.6 - Модель образца

При технологическом ППД ПС деталей, начальные технологические остаточные напряжения зависят от рабочих и монтажных напряжений в конструкции.

При развитии расчётных методик по определению напряжений в ПС деталей пар трения в настоящее время распространено применение метода конечных элементов (МКЭ). При этом конкретные рекомендации по эффективному использованию методик на базе МКЭ в технической литературе отсутствуют, нет мате-

матического пути решения сходимости по МКЭ, а используемое шаговое увеличение числа конечных элементов (КЭ) приводит к тому, что решение по МКЭ сходится при бесконечном увеличении числа КЭ. Поэтому требуется детальное изучение вопросов применения МКЭ в расчётах напряженного состояния прецизионных деталей. В представленной постановке МКЭ используется как дополнительный метод для создания новых конструкций на стадии проектирования с решением задачи параметрической оптимизации конструкции.

Решение задачи о напряженном состоянии сопряженной поверхности МКЭ проводится в линейной и геометрически нелинейной постановках; при этом алгоритм включает решение объёмной задачи в полярных координатах. В общем случае при расчете применяется тетраэдральная форма КЭ, использование которой позволяет переложить большую часть труда на автоматическую подготовку информации на ЭВМ. В представленной постановке МКЭ используется как дополнительный метод для создания новых конструкций регуляторов скорости непрямого действия на стадии проектирования дизелей с решением задачи параметрической оптимизации конструкции. Расчёт выполнен по комплексу программ Unigrafics, Desaignspase.

При определении реакций воспользуемся уравнением МКЭ, решение которого позволяет определить перемещение узловых точек схемы идеализации расчёта [15].

$$K \{d\} = \{R\}, \quad (2.16)$$

где  $K$  – матрица жёсткости конструкции в целом, она представляет собой сумму матриц жёсткости конечных элементов, из которых состоит конструкция;  $\{d\}$  – вектор перемещения всех узлов;  $\{R\}$  – вектор узловых нагрузок.

Для построения модели использован конечный элемент типа TETRA4. Разбивка выполнялась равномерной сеткой вдоль длины и диаметра, которая дала 9793 узла и 43944 конечных элементов. Физические и основные механические характеристики материала выбраны для стали 40Х.

Электрическая мощность, вырабатываемая генератором, составляет порядка 30 кВт в импульсе. С другой стороны механическая мощность может быть определена как скалярное произведение вектора силы на вектор скорости, с которой движется тело:

$$N = F \cdot v \cdot \cos\alpha \quad (2.17)$$

где:  $F$ — сила,  $v$ — скорость,  $\alpha$  — угол между вектором скорости и силы.

Учитывая, что электрический импульс, сообщаемый источнику вибрации, приводит к тому, что тело совершает перемещение на величину  $s = 50$  мкм за время  $t = 2,5 \cdot 10^{-6}$  с, а направление векторов приложения силы и скорости одинаковы, то формула (24) может быть приведена к виду

$$N = F \frac{s}{t} \quad (2.18)$$

Откуда:

$$F = N \frac{t}{s} = 30 \cdot 10^3 \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-6}} = 1500 \text{ Н}$$

В первом приближении принимаем, что значения сил инерции равномерно распределены по всему объему.

Учитывая, что построенная ранее механическая модель имеет 9793 узлов, получаем значение узловой нагрузки равное 0,153 Н.

При расчете собственных частот колебаний были рассмотрены два варианта закрепления образца: 1) по торцевой поверхности; 2) по торцевой и цилиндрической поверхностям.

Полученные значения частот колебаний представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 -Моды образца, полученные с использованием программы *COSMOS2Mver 2.7*

№ моды	Резонансная частота, Гц		Характер моды
	Вариант крепления №1	Вариант крепления №2	
1	2692	1025	Простой изгиб
2	2697	1025	Простой изгиб
3	10537	5706	Кручение
4	14250	6306	Сложный изгиб

1-я и 2-я собственные частоты близки и соответствуют колебаниям в плоскостях  $XU$  и  $XZ$ . 3 и 4-я гармоники имеют более сложный характер колебаний. Формы мод деталей на резонансных частотах вынужденных колебаний детали звукового диапазона показаны на рис. 2.7.

Для подтверждения данных полученных аналитическим путём был проведён эксперимент по определению собственных частот колебаний образца. В среде PowerGraph-Unttled был получен спектр экспериментального сигнала, с использованием разложения в ряд Фурье, (рисунок 2.8). Собственные частоты образца, полученные расчётным и экспериментальным путем, совпадают с точностью 95%.

Следовательно, вибрационная установка позволяет получать достоверные данные при исследовании резонансной частоты колебаний системы.

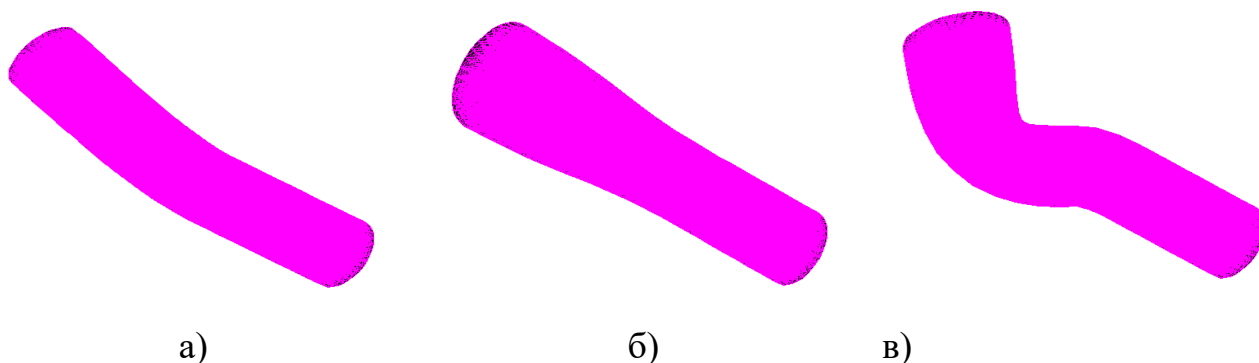


Рисунок 2.7 - Формы колебаний: а – первая (вторая); б – третья; в – четвертая

Таким образом, установлено, что собственную частоту колебаний деталей при обработке можно изменять за счет схемы базирования и привести к резонансу в звуковом частотном диапазоне 1,0...8,0 кГц. Это позволяет расширить номенклатуру обрабатываемых деталей.

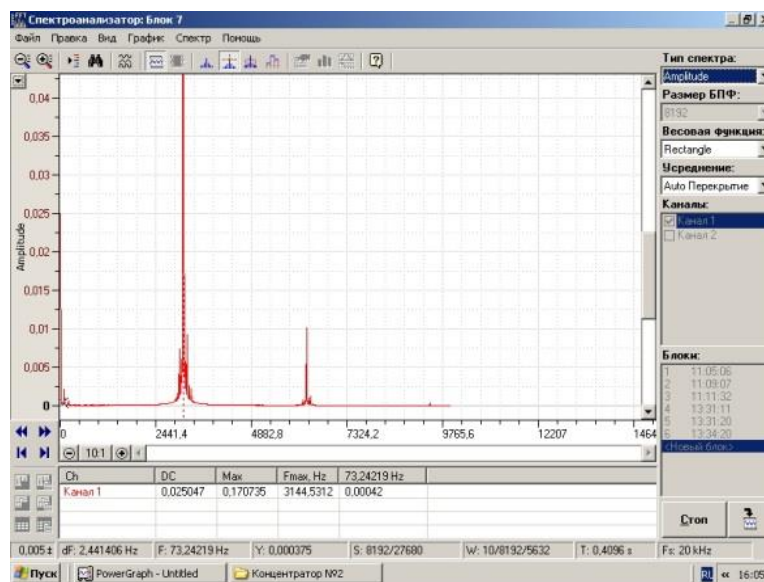


Рисунок 2.8 - Частотный спектр экспериментального сигнала для крепления №1

При АООКУС собственная частота колебаний детали определяется в составе звуковой колебательной системы. Фиксируется ряд гармоник в диапазоне 1,0...8 кГц и выбирается та, что обеспечивает максимум амплитуды. Вынужденные колебания с заданной резонансной частотой позволяют увеличить амплитуду колебаний в 10-30 раз (рисунок 2.7б). Это увеличение амплитуды дает эффект при обработке, влияющий на эксплуатационные характеристики поверхности.

## 2.8.2 Расчёт статического и динамического нагружений образца исследований

Определение реакций по граничным условиям для прецизионной детали в прямоугольной системе координат практически невозможно, так как требуется учет тангенциальных деформаций и перемещений, которые происходят в элемен-

тах регулятора скорости. Поэтому граничные условия рассматриваются в полярной системе координат.

Расчет значений перемещений и напряжений для случая статического нагружения.

Нагружения распределенной нагрузкой, численно равной силам инерции представлен на рисунке 2.9. Из расчётов видно, что напряжения связаны с деформациями.

Динамический расчет выполнен для случая импульсного приложения распределения нагрузки (рисунок 2.10).

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 15-30 МПа.

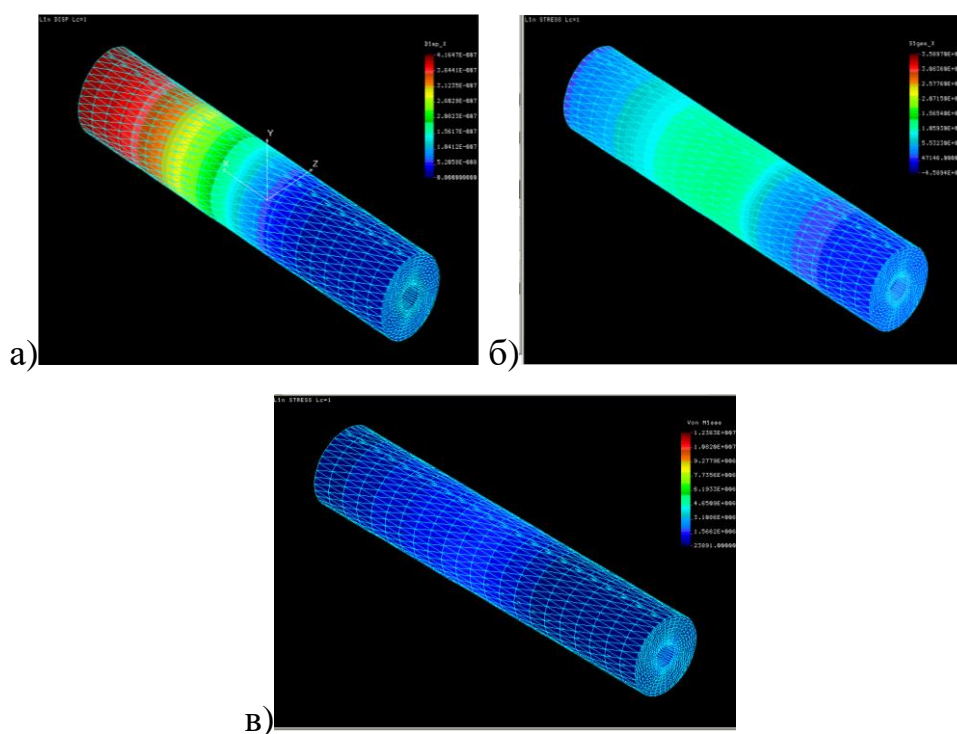


Рисунок 2.9 - Статический расчет напряжений без сопротивления среды: а) деформации образца вдоль его длины; б) продольные нормальные напряжения; в) эквивалентные напряжения по фон-Мизесу



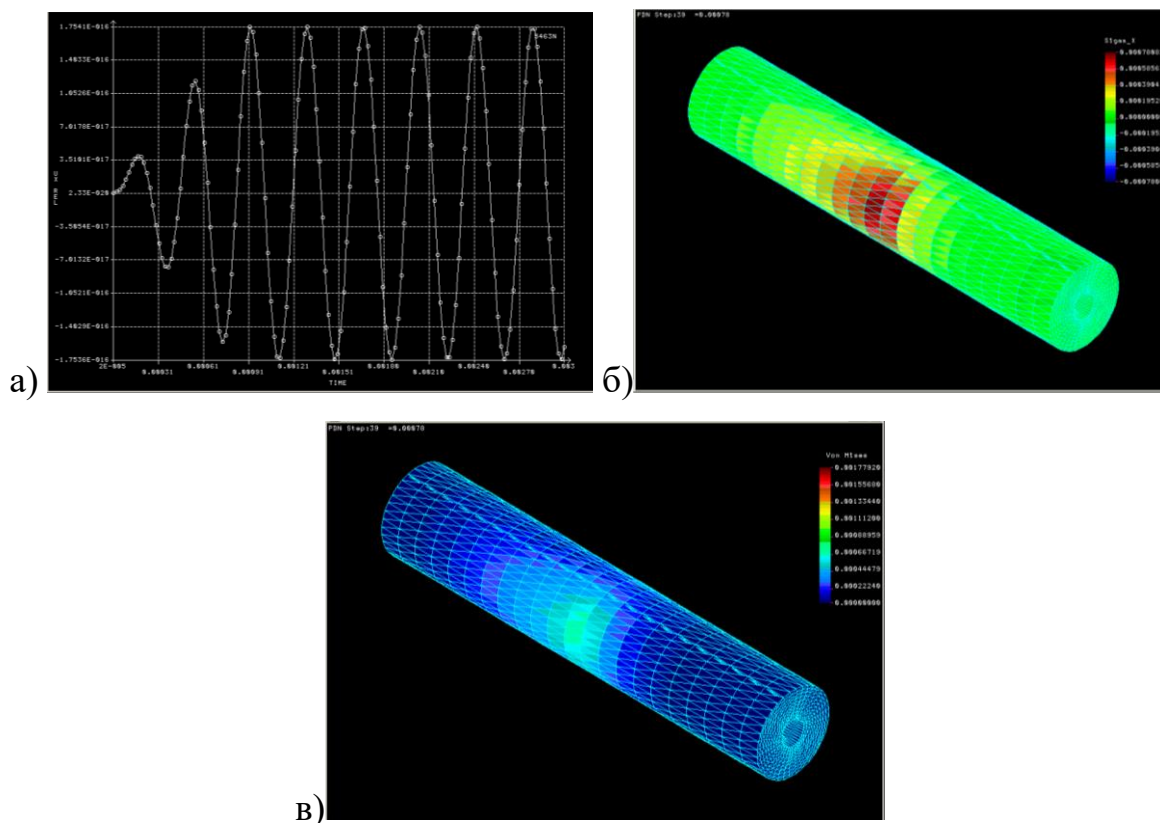


Рисунок 2.10 - Динамический расчет напряжений: а) зависимость перемещений вдоль оси  $x$  от времени для крайнего сечения; б) распределение  $\max$  продольных напряжений в установившемся режиме; в) распределение  $\max$  напряжений по фон Мизесу в установившемся режиме.

### 2.8.3 Влияния вязкоупругой среды на процесс колебаний

Практические расчеты влияния вязкоупругой среды на процесс колебаний выполнялись при помощи конечноэлементного пакета ABAQUS 6.11. Полученная КЭ модель представлена на рисунке 2.11.

В качестве объекта исследований был выбран шарнирный палец диаметром 18 мм и длиной 100 мм, закрепленный вдоль одного из краев. Возмущающее воздействие моделируется импульсной нагрузкой распределенной по объему детали и равной  $0,059 \text{ Н/мм}^3$ .

Для определения частоты возмущающей силы был выполнен расчет частоты собственных колебаний. Результаты расчета представлены в таблице 2.3.

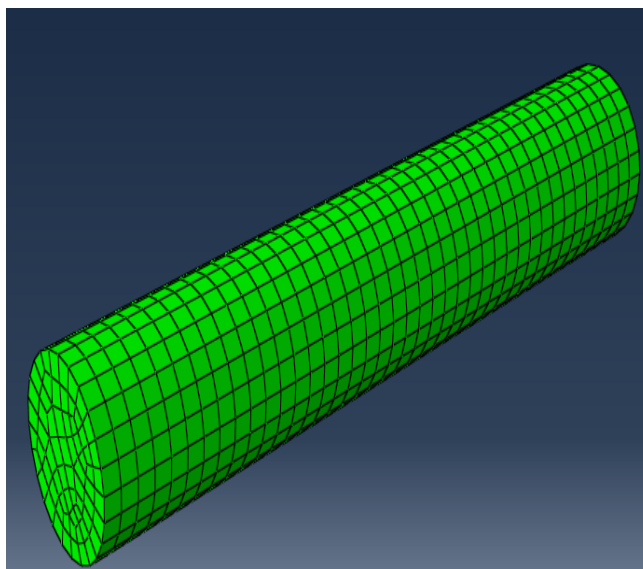


Рисунок 2.11 - Конечноэлементная модель пальца

Таблица 2.3 - Расчёт частот собственных колебаний

1	Mode	1: Value = 6.07008E+07	Freq = 1240.0	(cycles/time)
2	Mode	2: Value = 6.07904E+07	Freq = 1240.9	(cycles/time)
3	Mode	3: Value = 1.97288E+09	Freq = 7069.2	(cycles/time)
4	Mode	4: Value = 1.97559E+09	Freq = 7074.1	(cycles/time)
5	Mode	5: Value = 2.30419E+09	Freq = 7639.8	(cycles/time)

Возмущающая сила приложена импульсно в виде распределенной по объёму сжимающей нагрузки с частотой импульсов равной первой собственной частоте колебаний. Далее расчёты проведены для случая колебаний детали в среде с поверхностным трением, которое моделируется распределенной по поверхности силы трения. При расчётах задавалась сила трения с коэффициентом трения стали при движении в масле 0,015. Для сравнения также приведены расчёты для колебания исследуемого объекта в среде без сопротивления. Динамический расчёт без учёта и с учётом сил трения представлен на рисунках 2.12-2.13.

Из проведенных расчётов видно, что величины напряжений в ПС при взаимодействии с упругой средой повышаются до 25-30 МПа. Как можно увидеть из проведенных расчетов, величины напряжений для случая с трением повышаются, причем амплитуды колебаний при этом снижаются.

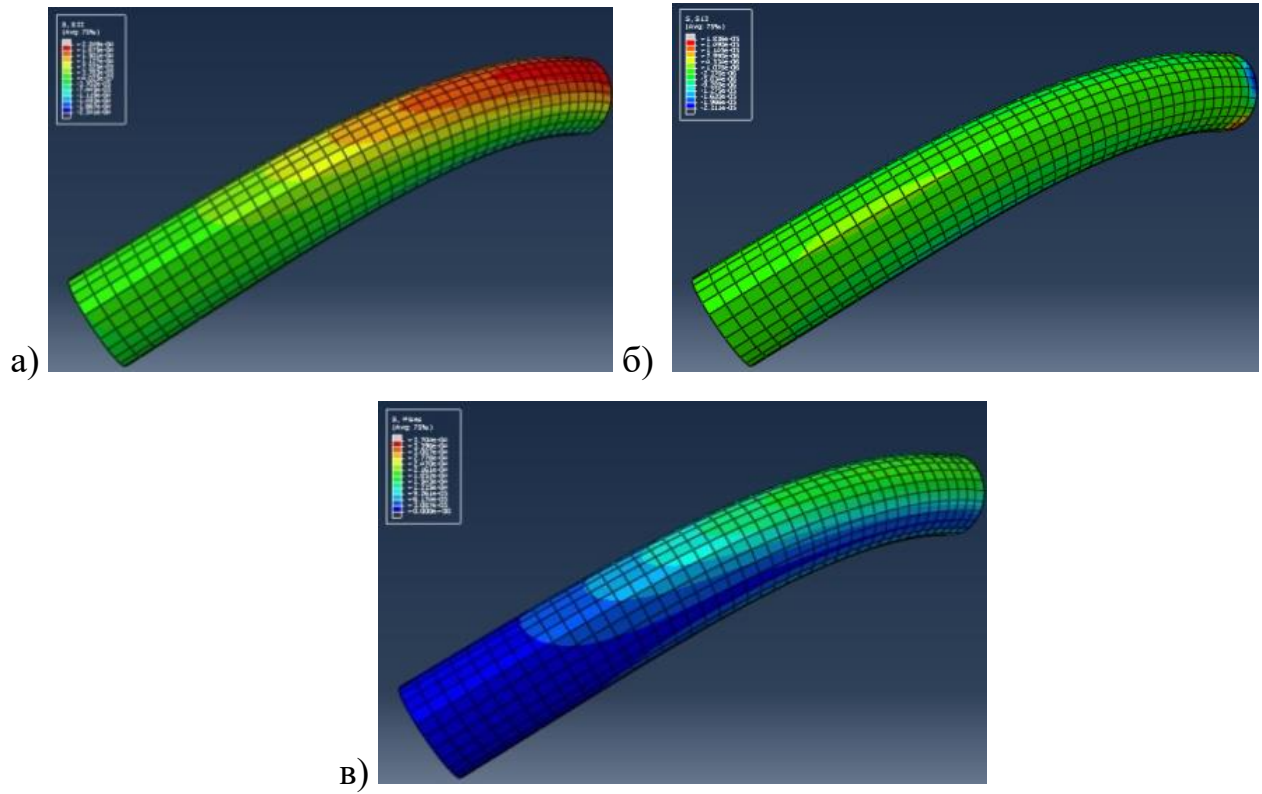


Рисунок 2.12 - Динамический расчет без учёта сил трения: а) продольные напряжения; б) касательные напряжения; в) напряжения по фон Мизесу.

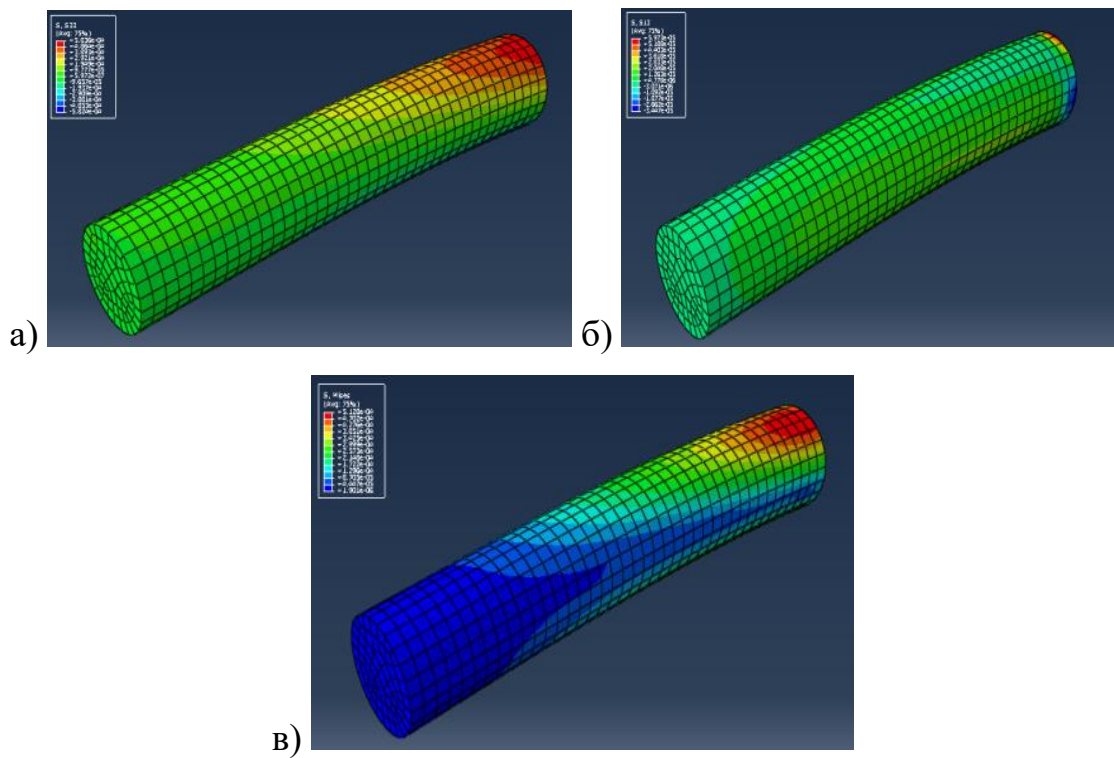


Рисунок 2.13 - Динамический расчет с учётом сил трения: а) продольные напряжения; б) касательные напряжения; в) напряжения по фон Мизесу.

### Выводы по второму разделу

1. При АООКУС в результате совокупности влияния сил трения, квазиупругой силы и кавитации на ПС возникают напряжения 45-50 МПа, вызывающие процесс технологического ППД на поверхности детали.
2. При колебаниях детали в резонансном режиме в технологической жидкости, напряжения, возникающие в ПС, увеличиваются на 40 %
3. Методика выбора геометрических размеров концентратора в зависимости от формы, размеров и материала обрабатываемой детали позволяет увеличить амплитуду колебаний до 100мкм.
4. Упрочнение стальной поверхности при АООКУС обусловлено формированием в ПС развитой дислокационной структуры, измельчением зерна и микронапряжениями.

## РАЗДЕЛ 3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АООКУС

### 3.1 Разработка вибрационной установки для осуществления АООКУС

Экспериментальные исследования посвящены проведению АООКУС деталей и определению изменения качества ПС при этом. Для экспериментального подтверждения результатов полученных во втором разделе необходимо создать вибрационную установку для АООКУС.

Основной целью эксперимента является задача - определить влияние режимов обработки, состава рабочей среды, конструкции концентратора на качество ПС.

Предложенная технология АООКУС стала основой создания экспериментальной вибрационной установки. Принцип работы установки основан на возбуждении вынужденных механических колебаний в режиме резонанса.

Для АООКУС разработана вибрационная установка (рисунки 3.1 - 3.2), включающая: электронный генератор импульсов звукового частотного диапазона колебаний (ЗГ 01); звуковую колебательную систему (ЗКС) на базе пьезопреобразователя энергии электрических колебаний в энергию упругих колебаний звукового частотного диапазона, жестко закрепленную на раме установки; электронный и виброизмерительный цифровой осциллограф, виброметр ПИ-19 и систему управления на базе персонального компьютера (ПК). Преимущества предлагаемой виброустановки перед существующими следующие: низкая себестоимость, работа в энергосберегающем режиме, простота конструкции.

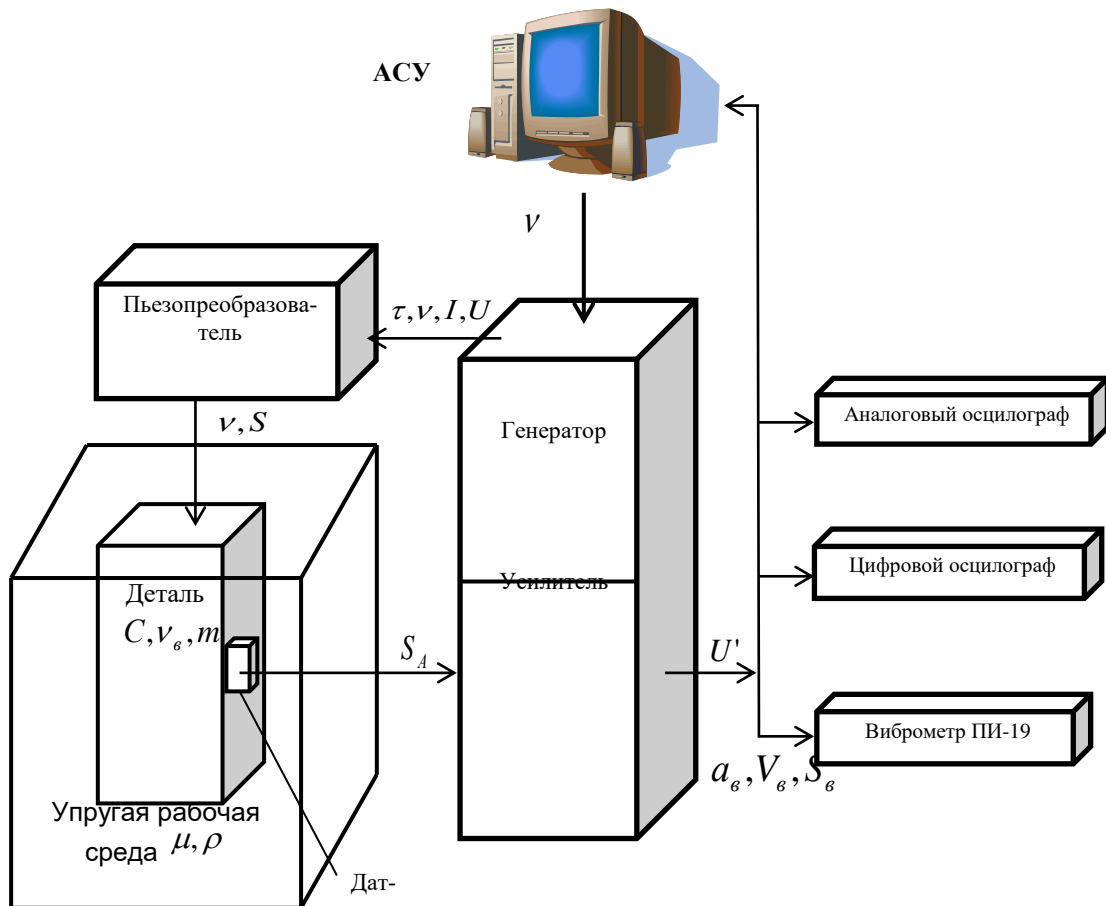


Рисунок 3.1 - Схема вибрационной установки



Рисунок 3.2 - Общий вид вибрационной установки

Работа вибрационной установки осуществляется следующим образом. К концентратору пьезопреобразователя втулкой с двусторонней резьбой крепится деталь. ЗГ 01 вырабатывает электрическую энергию звуковой частоты, которая поступает на пластины пьезопреобразователя и превращается в механические колебания волновода-концентратора. Бесперывные дискретные колебания звукового частотного диапазона заготовки возбуждаются пьезопреобразователем, питающимся от электронного генератора звуковых колебаний.

При включении задающего генератора, он начинает генерировать последовательность импульсов, которые поступают на вход триггера. На выходе триггера напряжение имеет форму меандра (прямоугольные импульсы разной полярности). На фронтах меандра формируются непарные импульсы, начиная с первого, а на убывающих – парные.

Таким образом, формируется два канала импульсов управления, которые поступают на усилитель импульсов. Усилитель импульсов – двухканальный и вырабатывает усиление по мощности, необходимое для включения тиристоров. Импульсы непарной последовательности включают тиристор, который создает на выходе генератора ЗГ 01 импульса положительной полярности, а парной последовательности – негативной полярности.

Акустический сигнал от детали принимается вибрационным датчиком, что превращает механические колебания в переменное напряжение той же частоты, который усиливается и измеряется вольтметром. Выполнение условий резонанса в исследуемой акустической системе отвечает резонансному пику на амплитудно-частотной характеристике.

Для настройки системы генератор-деталь в резонанс, в генераторе ЗГ 01 установлен усилитель пьезодатчика и микроамперметр. На вход усилителя могут подключаться датчики типа ДН-3, ДН-4, ДН-3 которые присоединяются к обрабатываемой детали. К выходу усилителя подключен микроамперметр и разъём для подключения измерительных приборов.

### 3.1.1 Разработка генератора

Основным элементом вибрационной установки есть разработанный задающий звуковой электронный генератор ЗГ 01. Генератор предназначен для преобразования электрической энергии бытовой сети в электрические колебания звуковой частоты, установления и поддержания требуемых параметров амплитуды выходного сигнала, поиска резонансной частоты ЗКС.

Техническая характеристика ЗГ 01 приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Техническая характеристика ЗГ 01

№№	Параметр	Значение
	Сеть питания генератора:	
1	Напряжение питания генератора, В	65
2	Частота, Гц	50
3	Максимальная мощность генератора	0,4 кВт
4	Регулирование мощности	плавное
5	Импульсная мощность	0,1-30 кВт
6	Длительность импульсов	20-25 мкс
	Сеть питания цепей управления	
7	Частота следования импульсов, Гц	500-5000 Гц
8	Регулирование частоты	плавное
9	Напряжение источника питания цепей управления, В	220
10	Частота, Гц	50
11	Мощность цепей управления, кВт	0,1
	Усилитель пьезодатчика	
12	Полоса пропускания, Гц	20-12500
13	Коэффициент усиления	0-100
14	Регулировка усиления	плавная
15	Габаритные размеры, мм	230x350x500
16	Масса, кг	25

Генератор смонтирован в стальном корпусе, который состоит из двух отсеков. В одном смонтирован генератор тиристора, в другом - схемы управления. Охлаждение тиристорov осуществляется принудительно и производится вентиля-



тором. Расположение органов управления и присоединительных разъемов приведено на рисунке 3.3.

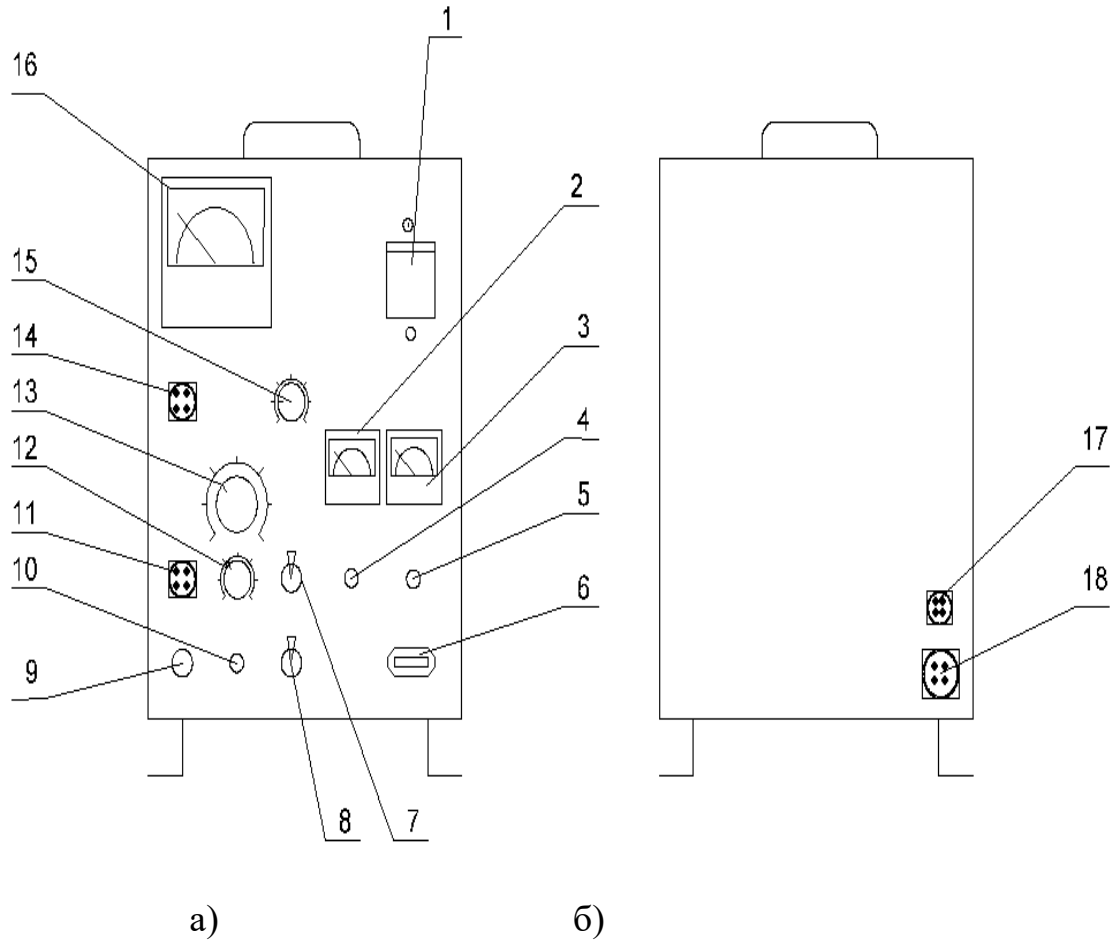


Рисунок 3.3. Схема передней (а) и задней (б) управляющих панелей генератора:  
 1 - автоматический выключатель; 2 – вольтметр для контроля напряжения питания генератора; 3 - амперметр для контроля тока питания генератора; 4 - кнопка «ПУСК»; 5 - кнопка «СТОП»; 6 - разъем для подключения пьезопреобразователь; 7 - тумблер « РАБОТА-КОНТРОЛЬ»; 8 - тумблер «Сеть» для включения напряжения сети источника питания цепей управления; 9 - предохранитель для защиты источника питания цепей управления; 10 - лампа контроля сети цепей управления; 11 - разъем для подключения осциллографа и других приборов; 12 - регулировщик «ЧАСТОТА ТОНКО»; 13 - регулировщик «ЧАСТОТА»; 14 - разъем - для подключения пьезодатчика; 15 - регулировщик «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ» для чувствительности усилителя пьезодатчика; 16 - микроамперметр индикатор резонанса; 17 - разъем для подключения сети питания цепей управления ~220В; 18 - разъем для подключения напряжения питания генератора ~65В.

Общий вид передней панели представлен на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4. Внешний вид передней панели генератора

Структурная схема генератора ЗГ 01 приведена на рисунке 3.5. Генератор состоит из следующих функциональных узлов: выпрямитель генератора, тиристорный генератор, схема защиты по току, задающий генератор-формирователь импульсов управления, усилитель импульсов управления, усилитель пьезодатчика, выпрямитель цепей управления, X1-X9 –соединительные разъёмы.

Генератор ЗГ 01 работает следующим образом. Включается напряжение питающей сети. Устанавливается режим работы «ГЕНЕРАТОР» и производится включение генератора кнопкой «ПУСК». Выключение генератора производится кнопкой СТОП. Для защиты генератора от перегрузок и аварийного состояния установлена схема защиты по току.

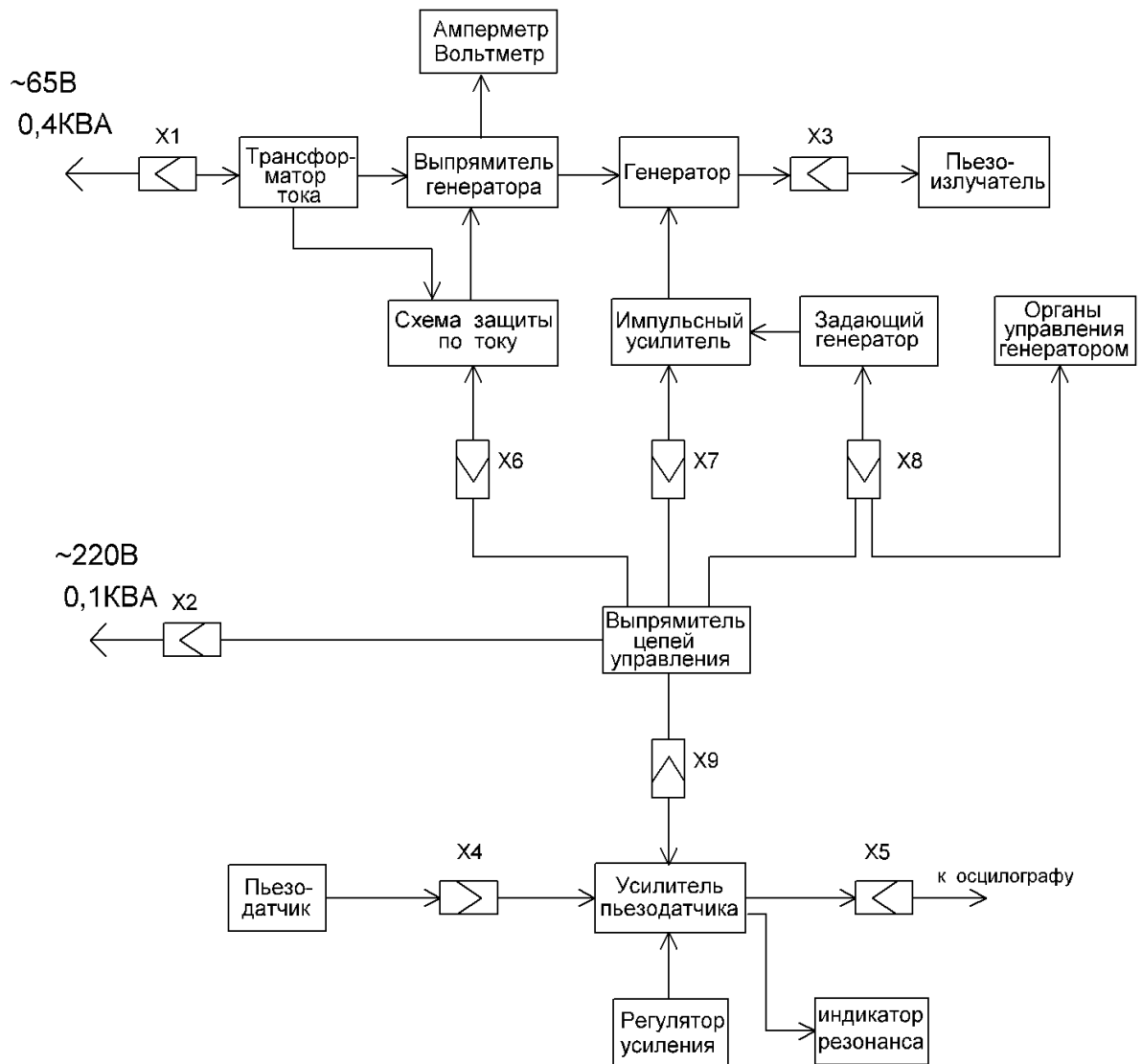


Рисунок 3.5. Структурная схема генератора 3Г 01

Схема работает следующим образом. Напряжение с датчика тока, установленного в цепи питания генератора, поступает в схему защиты по току, на компаратор (схему сравнения), порог срабатывания которого настроен на максимально допустимый ток. При увеличении тока выше допустимого схема защиты выключает выпрямитель генератора и генератор выключается. Контроль тока и напряжения питания генератора осуществляется вольтметром и амперметром.

Для настройки системы генератор-деталь в резонанс, в генераторе 3Г 01 установлен усилитель пьезодатчика и микроамперметр. На вход усилителя (разъём X4) могут подключаться датчики типа ДН-3, которые присоединяются к обра-

батываемой детали. К выходу усилителя подключен микроамперметр и разъём (X5) для подключения измерительных приборов. В момент возникновения резонанса в системе генератор-деталь происходит резкое и максимальное отклонение стрелки микроамперметра.

Выпрямитель цепей управления состоит из понижающего трансформатора, выпрямительных диодов, электронных стабилизаторов напряжения, и предназначен для обеспечения стабилизированным напряжением схемы управления.

### 3.1.2 Выбор ЗКС

ЗКС предназначена для преобразования энергии электрических колебаний в механические колебания звуковой частоты (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 - Внешний вид ЗКС

ЗКС состоит из электромеханического преобразователя пьезоэлектрического типа, построенного на основе 12 кольцевых элементов из пьезокерамики, и концентратора предназначенного для передачи механических колебаний требуемой интенсивности обрабатываемой детали (рисунок 3.7).

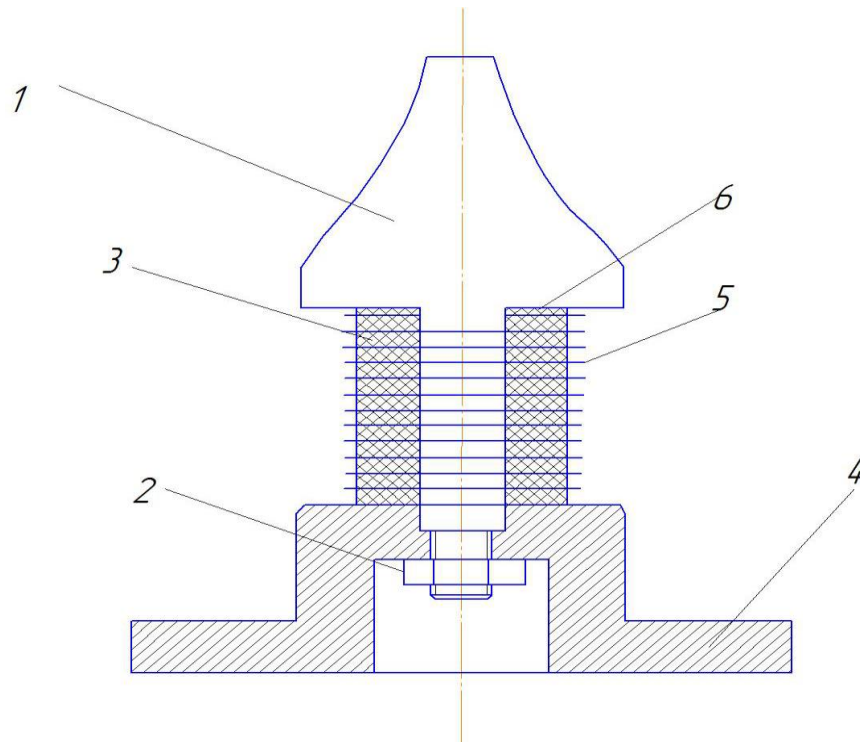


Рисунок 3.7. Схема пьезопреобразователя

Волновод 1 с помощью гайки 2 соединяет пьезокерамические пластины 3 с отражателем 4. Часть концентратора внутри пьезокерамических пластин обмотана изолирующим материалом. При подаче тока на контактные шайбы 5 и пьезокерамические пластины 3 действует электрическое поле и благодаря пьезоэффекту пластины 3 изменяют свои размеры. Концентратор отделен от контактной шайбы прокладкой 6. Изменение размеров пьезокерамических элементов приводит к перемещениям волновода 1, который одновременно является концентратором колебаний и осуществляет их усиление.

Таблица 3.2 - Параметры элементов ЗКС

Элемент	Толщина	Плотность	Модуль упругости	Вязкость
Демпфер (акриловая смола с наполнителем $Pb_2O_3$ )	6 мм	8200 кг/м <sup>3</sup>	70 ГПа	800 Па/с
Электроды пьезоэлемента (медь)	0,05 мм	8930 кг/м <sup>3</sup>	82,7 ГПа	0
Концентратор (сталь Ст20)	32 мм	7800 кг/м <sup>3</sup>	275 ГПа	0

### 3.1.2.1. Разработка пьезопреобразователя

В ультразвуковых колебательных системах применяются магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи. Недостатком магнитострикционного преобразователя является условие обязательного постоянного охлаждения водой работающего преобразователя и потребляемая мощность 2,5 кВт. Поэтому в разработанной ЗКС используется пьезопреобразователь электрических сигналов в механические перемещения, отличающийся простотой, повышенным КПД, более низкой потребляемой мощностью.

В пьезопреобразователе используются пьезокерамические элементы из материалов средней сегнетожесткости. Эти материалы, характеризуются высокой механической добротностью, малыми диэлектрическими потерями, в том числе в сильных электрических полях. К пьезокерамическим элементам, изготовленным из данных материалов, предъявляются жесткие требования к их электрофизическим параметрам в условиях их работы в сильных электрических полях и при больших механических напряжениях. Параметры пьезокерамического материала ЦСТ Ст3 представлены в таблице 3.3 [ЖКГД. 430327.004ТУ]. Для изготовления УЗКС используем материал ЦТСС-3, используемый для пьезопреобразователей, работающих в режиме приёма или излучения в условиях воздействия сильных электрических полей и механических напряжений.

Таблица 3.3 - Параметры пьезокерамического материала ЦСТ Ст3

$T_k$ , °C	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ ,	$Q_m$ ,	$v_1^E$ , $10^3$ м/с	$\sigma_p$	$k_p$	$d_{31}$ , $10^{-12}$ Кл/Н	$d_{33}$ , $10^{-12}$ Кл/Н	$g_{31}$ , $10^{-3}$ В*м/Н	$g_{33}$ , $10^{-3}$ В*м/Н	$T_{раб}$ , °C	$\rho_v$ , $10^8$ , Ом*м	$P$ $10^3$ кг/м <sup>3</sup>
280	1400/ $8,85 \cdot 10^{-12}$	800	3,3	0,35	0,55	-140	275	-11,3	22,2	150	5	7,5

где  $T_k$  - температура точки Кюри;  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$  - относительная диэлектрическая проницаемость;  $Q_m$  - механическая добротность;  $v_1^E$  - скорость звука;  $\sigma_p$  - планарный ко-

коэффициент Пуассона;  $k_p$  - коэффициент электромеханической связи планарной моды;  $d_{31}$ ,  $d_{33}$  - пьезоэлектрические модули;  $g_{31}$ ,  $g_{33}$  - электрические константы по напряжению (чувствительность в режиме приема);  $T_{раб}$  - рекомендуемая повышенная температура;  $\rho_v$  - удельное объемное электрическое сопротивление;  $\rho$  - плотность.

Используем диски пьезомодулем  $d_{33}$ , толщиной 6 мм, наружным диаметром 30,14 мм, и внутренним диаметром 14 мм.

Деформация элемента определяется по формуле:

$$r = dE, \quad (3.1)$$

где  $r$  - деформация;  $E$  - напряженность электрического поля.

Пьезомодуль  $d$  для прямого и обратного эффектов имеет одно и то же значение. При толщине пластины  $L=0,006$  м и напряжении  $U=100$  В напряженность поля между электродами определяется следующим образом:

$$E=U/L=100/0.006=16667 \text{ В/м}, \quad (3.2)$$

Тогда деформация одной пластины:

$$r = 275 * 10^{-12} * 16667 = 4.58 * 10^{-6} \text{ м},$$

Емкость одной пластины:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{L}, \quad (3.3)$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0=8,85*10^{-12}$  Ф/м - абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $S=0.004\text{м}^2$  - площадь кольца.

$$C = \frac{1400 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 0.004}{0.006} = 0,008 \text{ мкФ.}$$

Для десяти пластин соответственно 0,08 мкФ, принимаем 0,1 мкФ.

Тогда энергия заряда в 10 пластинах:

$$E = C \cdot U^2 / 2 = 0,1 \cdot 0,000001 \cdot 100 \cdot 100 / 2 = 0.0005 \text{ Дж,} \quad (3.4)$$

Если управление одним устройством будет происходить хотя бы с частотой  $f=1000$  Гц, то требуется подводить энергию с мощностью:

$$W = E \cdot f = 0,5 \text{ Дж/с} = 0,5 \text{ Вт,} \quad (3.5)$$

Сдвиг пьезопластины определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\kappa} = d_{33} \cdot E + S_p^E \cdot \sigma_p = 275 \cdot 0,0005 + 0,004 \cdot 0,35 = 0,1389, \quad (3.6)$$

В процессе работы пьезопреобразователя пьезопластины испытывают деформации по толщине и длине.

Резонансная частота  $f_p$  определяется по формуле:

$$f_p = \frac{f_0}{\sqrt{1-k^2}} \quad (3.7)$$

где  $f_0$  - собственная частота пьезоэлектрического преобразователя, которая вычисляется по формуле:

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{2 \cdot d} = \frac{\sqrt{\frac{64 \cdot 10^9}{7,4 \cdot 10^3}}}{2 \cdot 30,14} = 48 \text{ Гц} \quad (3.8)$$



Следовательно,

$$f_p = \frac{48}{\sqrt{1-0,67^2}} = 87,3 \text{ Гц},$$

Антирезонансная частота пьезоэлемента, имеющего форму диска равна собственной частоте  $f_a = f_0 = 87,3 \text{ Гц}$ .

Рассчитываем частотный коэффициент  $N_f$ , часто называемый частотной постоянной по формуле:

$$N_f = 2 * R * f_p = 2 * 30,14 * 87,3 = 52624, \quad (3.9)$$

Расчёт скорости звука  $C_{зв}$  в пьезомодуле используя резонансную частоту  $f_p$  по формуле:

$$C_{зв} = \pi * R * f_p = 3,14 * 30,14 * 87,3 = 8262,03, \quad (3.10)$$

Зная геометрические размеры пьезомодуля, и используя формулу (3.11) рассчитываем площадь возникновения заряда  $S$ :

$$S = 2 * \pi * R^2 = 2 * 3,14 * 30,14^2 = 52624 \text{ мм}^2 \quad (3.11)$$

Расчёт максимального механического напряжения  $\sigma_{max}$  под действием максимальной силы  $F_{max}$  по формуле:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S} = 4,252 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 \quad (3.12)$$

Допустимое механическое напряжение при сжатии ( $\sigma_{sg}$ ) пьезоэлемента, выполненного из пьезокерамики составляет  $24 * 10^7$ . Произведём проверку условия  $\sigma_{max} \leq \sigma_{sg}$ :

$$252 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 \leq 24 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$$

### 3.1.2.2. Моделирование концентратора линейных колебательных процессов

Амплитудой перемещений можно управлять с помощью геометрии концентратора, который входит в состав пьезопреобразователя. Исследование физико-технических особенностей ультразвукового концентратора проводилось с использованием аппарата механики сплошной среды в трехмерной постановке. В работе моделируется трехмерный концентратор сдвигов. Спроектированная конструкция концентратора, которая позволила довести коэффициент увеличения амплитуды перемещений от 4 (конусообразный) до 20. Проведены расчеты разных ультразвуковых ступенчато-радиальных колебательных систем при разных длинах и диаметрах ступеньки концентратора (рисунок 3.8).

Для моделирования использовался квадратичный конечный элемент SOLID 92.

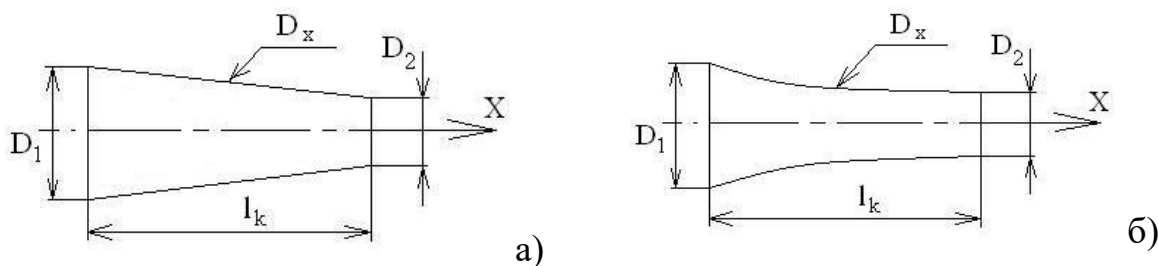


Рисунок 3.8 - Геометрия концентраторов (а - конусообразный, б - радиально-цилиндрический)

Анализ вынужденных колебаний является способом определения постоянного процесса отклика линейной модели на нагрузку, которые меняются во времени по синусоидальному (гармоническому) закону. Смысл расчетов состоит в моделировании процесса на разработанной каскадной эволюционной сети на базе элементов, которые позволяют осуществить вычисление функции отклика показателей процесса от частоты.

В данной работе расчет акустического концентратора перемещений прово-

дился с помощью программного комплекса ANSYS 13.

Для моделирования использовалась относительная система координат, с точкой начала координат в центре плоскости соприкосновения пьезоэлектрического преобразователя и концентратора перемещений. Ось  $O_z$  направлена вдоль оси акустического концентратора, а оси  $O_y$  и  $O_x$  лежат в плоскости перпендикулярной оси

В рамках теории упругости уравнение движения в матричной форме может быть записано так:

$$M \cdot \ddot{U} + C \cdot \dot{U} + K \cdot U = F, \quad (3.13)$$

где  $M$  – матрица масс;  $C$  – матрица затухания (сопротивления);  $K$  – матрица жесткости;  $F$  – вектор приложенной нагрузки;  $U = (U_x, U_y, U_z)$  – вектор смещения материальных точек из положения равновесия.

Концентратор изготовлен из стали 45, физические свойства которой приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Свойства материала модели

Наименование материала	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность $\rho$ , $10^3 \text{ кг/м}^3$
Сталь 45	$2 \cdot 10^5$	0.3	7,826

В качестве граничных условий использовались следующие: в области контактного взаимодействия концентратора с пьезоэлектрическим преобразователем на боковой поверхности объема запрещены радиальные и окружные смещения узлов, на торцевой поверхности объема запрещены все смещения узлов. Очевидно, что при работе концентратора в системе с преобразователем продольные перемещения торца последнего равны перемещениям основания концентратора

вследствие их жесткого соединения. При этом на узлы концентратора, соприкасающиеся с преобразователем, вдоль оси  $O_z$  концентратора действует периодическая нагрузка (смещение) с частотой  $700\text{Hz} - 9\text{kHz}$ . Максимальная величина перемещений поверхности пьезокерамических элементов в предварительно напряженном состоянии ограничена прочностью материала и не может превышать 5-7 мкм, поэтому полагалось, что на узлы концентратора действует нагрузка:

$$u = u_0 \sin(2\pi f t), \quad (3.14)$$

где  $u_0 = 3\text{мкм}$ ;  $f$  – частота.

Для сходимости численных результатов пространственное и временное разрешения (дискретизация) являются критическими. Выбор шага интегрирования  $\Delta t$  является важным для точности решения уравнения (3.13). С одной стороны, точность моделирования увеличивается при уменьшении шага  $\Delta t$ . Для больших шагов  $\Delta t$  решение в высокочастотном диапазоне получается с большой погрешностью. С другой стороны, уменьшение шага приводит к увеличению времени решения задачи. Оптимальным решением этого вопроса для схемы интегрирования Ньюмарка является использование 20 точек на один период максимальной частоты из цуга распространяющихся волн. Это условие можно записать так:

$$\Delta t = \frac{1}{20 f_{\max}}, \quad (3.15)$$

где  $f_{\max}$  - максимальная из используемых частот.

В настоящей работе моделируется трехмерный концентратор смещений. При этом распределение массы по элементам считается однородным, а размер элементов подбирается таким, чтобы распространяющаяся волна могла быть пространственно разрешена. Решение с хорошей степенью точности дает использо-

вание от 10 до 20 узлов конечно-элементной модели на длину волны, т.е.

$$l_e = \frac{\lambda_{\min}}{20} \dots \frac{\lambda_{\min}}{10}, \quad (3.16)$$

где  $l_e$  - характерный размер конечных элементов,  $\lambda_{\min}$  - наименьшая из рассматриваемых длин волн.

Начальной фазой выполнения гармонического анализа является модальный анализ, который используется для определения характеристик вибраций (собственных частот и форм колебаний) конструкции. Собственные частоты и формы колебаний являются важными параметрами, учитываемыми при проектировании конструкций в целях учета динамического нагружения.

### 3.1.2.3. Проектирование концентратора ЗКС

Расчет форм и частот собственных колебаний концентратора проводится при следующих допущениях:

- 1) линейное упругое поведение материалов, поэтому все нелинейные особенности игнорируются, даже если таковые были определены;
- 2) используется теория малых деформаций, поэтому не учитываются нелинейные эффекты.

В работе получена зависимость резонансной частоты продольных колебаний акустического концентратора от его геометрических параметров. При увеличении диаметра цилиндрической части концентратора и его длины резонансная частота уменьшается, как показано на рисунке 3.9.

При фиксированных размерах цилиндрической части концентратора увеличение длины профильной части концентратора приводит к резкому уменьшению резонансной частоты. При этом коэффициент усиления колебаний остается неизменным.

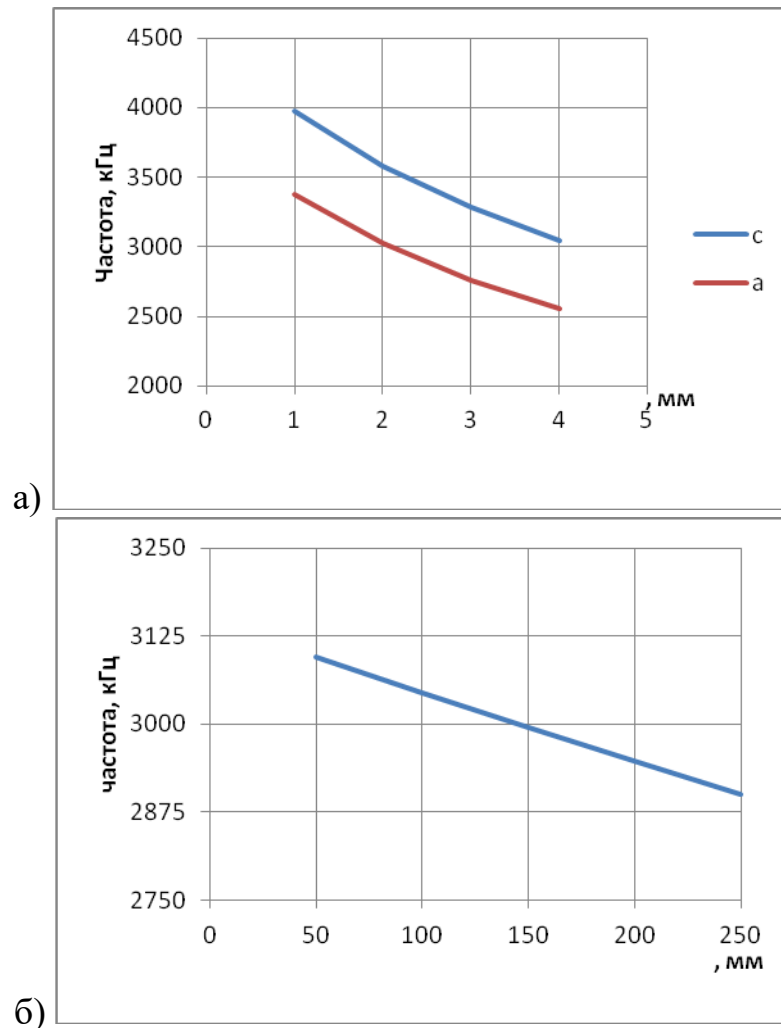


Рисунок 3.9 - Зависимость резонансной частоты колебаний концентратора от:  
а) толщины  $c$  и ширины  $a$ ; б) длины.

Для примера рассмотрим результаты расчета для концентратора длиной  $b = 160e - 3m$ , шириной ступеньки  $a = 30e - 3m$  и ее толщиной  $c = 30e - 3m$ . Акустический концентратор с такими геометрическими размерами в диапазоне частот  $f = 700 \div 9000 Hz$  имеет три резонансные частоты (рисунок 3.10). Частоты  $f_1 = 810.21Hz$  и  $f_2 = 810.66Hz$  соответствуют изгибным колебаниям концентратора в плоскости перпендикулярной оси.

На частоте  $f_3 = 3314.7Hz$  происходит резонансное увеличение продольных колебаний, как показано на рисунках 3.11 - 3.14. При приближении к резонансной частоте  $f_3 = 3314.7Hz$  компоненты перемещений  $UX$  и  $UY$ , лежащие в плоскости, перпендикулярной оси концентратора, стремятся к нулю, а компонента пере-

мещений  $UZ$ , параллельная оси симметрии концентратора, стремительно возрастает, что свидетельствует о переходе продольных колебаний в резонансный режим.

\*\*\*\*\* INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE \*\*\*\*\*

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	810.21	1	1	1
2	810.66	1	2	2
3	3314.7	1	3	3

Рисунок 3.10 - Расчет частот резонансных частот

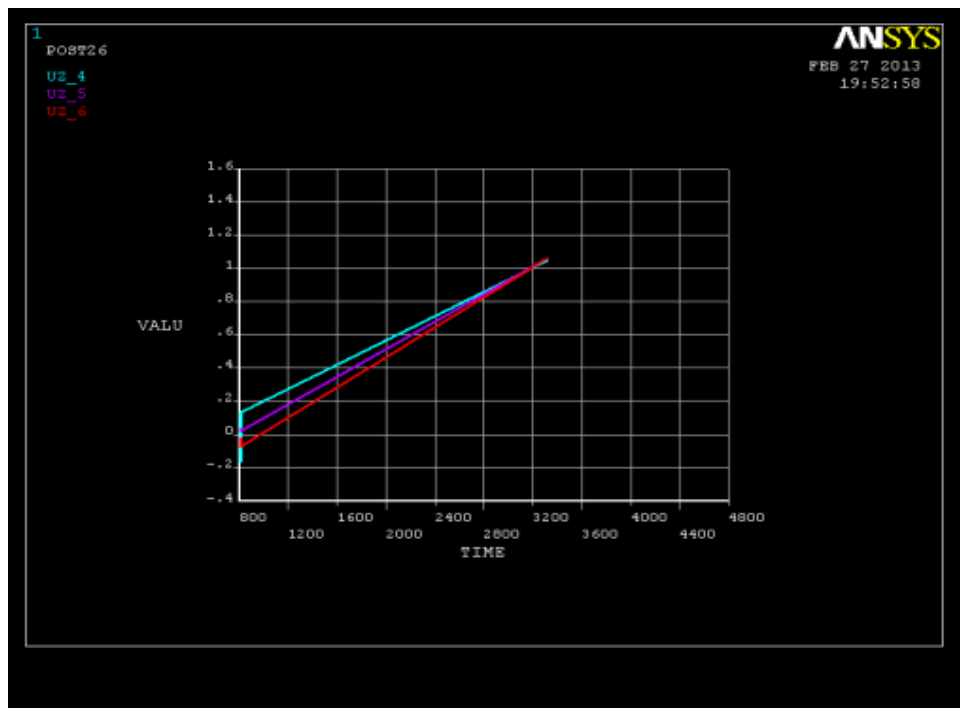


Рисунок 3.11 - Зависимость амплитуды продольных колебаний  $UZ$  от  $f$  в узле на выходном сечении концентратора (оси:  $x$ - частота  $f$ ,  $Hz$ ;  $y$ - перемещение  $UZ$ ,  $10^2$ мкм).

Также можно утверждать, что в главном приближении теория о том, что в процессе резонансных продольных колебаний поперечные сечения остаются

плоскими, справедлива. Размах амплитуды колебаний узлов на выходном сечении концентратора для данной геометрии составляет около 100 мкм.

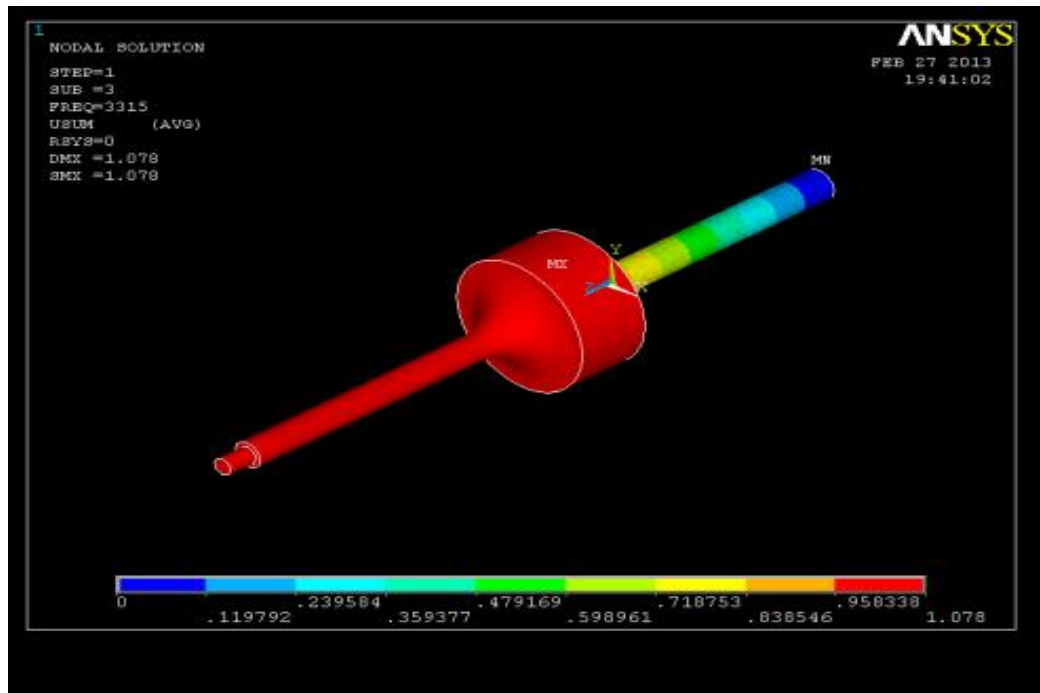


Рисунок 3.12 - Распределение смещений  $\vec{U}$  на резонансной частоте  $f_3 = 3314.7 \text{ Hz}$

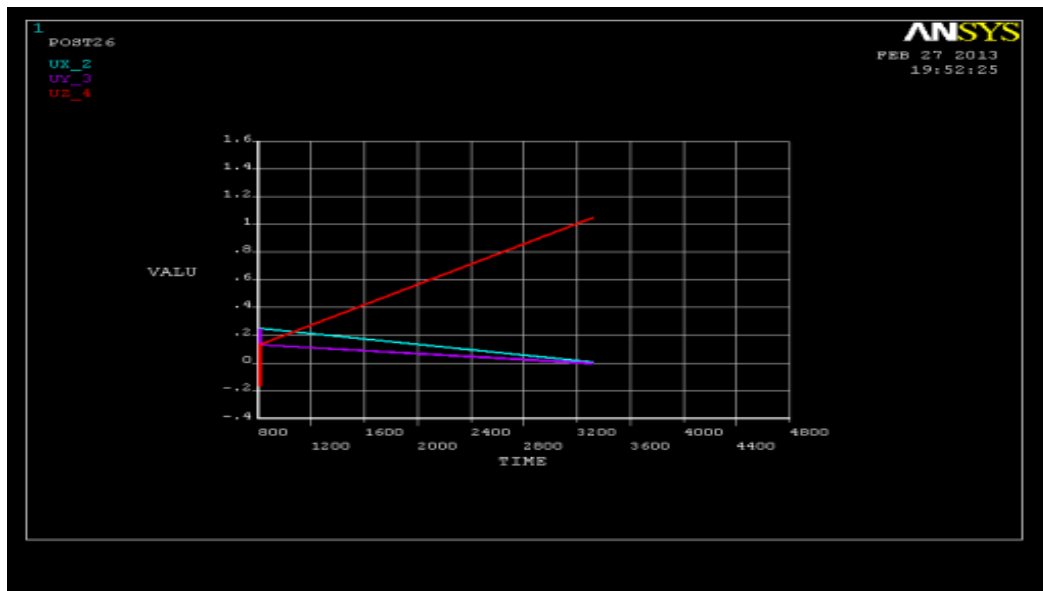


Рисунок 3.13 - Зависимость компонент вектора смещений  $\vec{U} = (UX, UY, UZ)$  от частоты в узле на выходном сечении концентратора (оси: x - частота  $f, \text{ Hz}$ ; y-перемещение  $UZ, \cdot 10^2 \text{ мкм}$ )



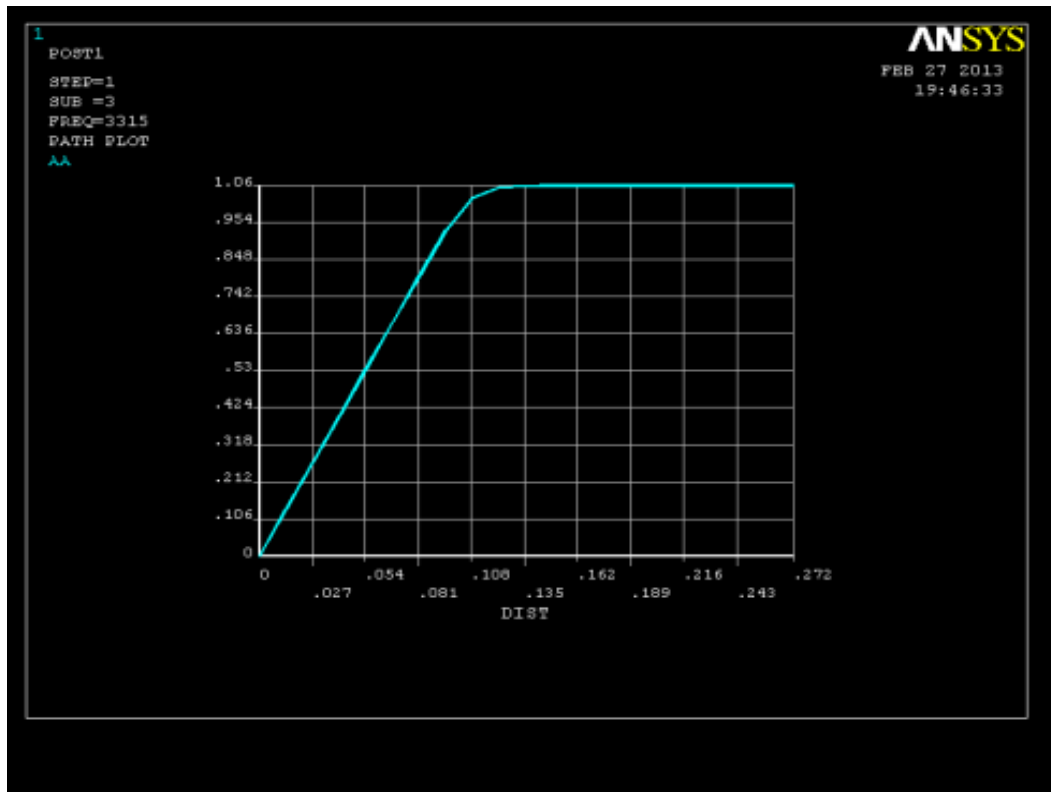


Рисунок 3.14 - Изменение компоненты перемещений  $UZ$  вдоль оси концентратора на резонансной частоте (оси:  $x$  - расстояние, м;  
 $y$  - перемещение  $UZ$ ,  $\cdot 10^2 \mu\text{м}$ )

Таким образом, для радиально-ступенчатого акустического концентратора с размерами - длина  $b = 160e - 3\text{м}$ , ширина ступеньки  $a = 30e - 3\text{м}$  и ее толщина  $c = 30e - 3\text{м}$  - резонансная частота продольных колебаний составляет  $f_3 = 3314.7\text{Hz}$ , коэффициент усиления колебаний 20. При изменении геометрических размеров концентратора существенно изменяется амплитуда продольных колебаний, в то время как коэффициент усиления колебаний остается порядка 20.

### 3.1.3. Выбор концентратора

В ЗКС использовались концентраторы-волноводы 3 видов (рисунок 3.15).



а)

б)

в)

Рисунок 3.15 - Концентраторы ЗКС: а) №1, профильно-цилиндрический, б) №2, конусообразный; в) №3, цилиндрический.

### 3.1.4. Приборы и приспособления для измерений в процессе исследований

Измерение шероховатости поверхности обрабатываемой детали проводилось на портативном профилометре-профилограме типа TR-200, разработанном компанией *Time Grouping* (рисунок 3.16). Профилограф-профилометр предназначен для измерения более 15 параметров шероховатости, визуального и графического отображения результатов измерений, статистической обработки с помощью высокопроизводительного компьютера или персональной ЭВМ через последовательный интерфейс, с возможностью вывода результатов на печатающее устройство. Измеряемые параметры шероховатости:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_y$ ,  $R_q$ ,  $R_b$ ,  $R_p$ ,  $R_{max}$ ,  $R_v$ ,  $R_{3z}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sm}$ ,  $R_{Sk}$ ,  $R_{mr}$ , исходный профиль ( $P$ ),  $t_p$ .



Рисунок 3.16 - Цифровой профилометр-профилограф типа TR-200

Твердость обрабатываемой поверхности детали измерялась прибором марки электронный твердомер малогабаритный ЕТМ-01 (рисунок 3.17).



Рисунок 3.17 - Твердомер ЕТМ-01

Диаметр и номинальные размеры образцов измерялись микрометром DSWQ0-100II с точностью 0.001 мм (рисунок 3.18). Диапазон измерения от 0 до 25 мм.



Рисунок 3.18. Микрометр DSWQ0-100II

Визуальные наблюдения состояния обрабатываемой поверхности образцов осуществлялись на микроскопе металлографическом Метам Р-1 с 50...507 кратным увеличением (рисунок 3.19). Микроскоп Метам Р-1 предназначен для изучения структуры металлов в отраженном свете и светлом поле при прямом освещении, в темном поле, в поляризованном свете.



Рисунок 3.19. Металлографический микроскоп Метам Р-1

Амплитуда измерялась с помощью виброметра ВМ-1 (рисунок 3.20).



Рисунок 3.20. Виброметр ВМ-1

Перемещения детали измерялись с помощью датчиков ДН-3, ДН-4, ДН-5 (рисунок 3.21), предназначенных для преобразования механических колебаний в электрические сигналы, пропорциональные ускорению колеблющегося объекта. Применяются совместно с виброизмерительными устройствами в лабораторных и заводских условиях. Принцип действия преобразователей основан на прямом пьезоэффекте, т.е. появлении зарядов на гранях пьезоэлемента при его механической деформации. Вибропреобразователь состоит из основания, пьезоэлементов, инерционной массы, контактов для снятия электрического потенциала и втулки. Статическая нагрузка на пьезоэлементы осуществляется пружинной гайкой. Верхнее значение рабочего диапазона частот: 4000 Гц (ДН-3); 12500 Гц (ДН-4); 500 Гц (ДН-5). Нижнее значение диапазона частот определяется входными параметрами виброизмерительных устройств.

### 3.1.5 Образцы для исследований

При выборе материалов образцов для экспериментальных исследований учитывалась возможность применения результатов исследований для обработки

деталей из материалов, используемых при изготовлении деталей узлов трения машин. Также учитывалось увеличение применения алюминиевых деталей в автомобилестроении.



Рисунок 3.21 - Вибродатчики ДН-3, ДН-4, ДН-5

В связи с этим были выбраны следующие материалы: Ст40 ГОСТ 1050-88, АД-0 ГОСТ 4784-97, Д 16, ГОСТ4784-97, Латунь ЛС 63 ГОСТ 2060-90 . Представленные материалы обладают различным химическим составом и физико-механическими свойствами. В качестве предварительной обработки использовалось точение, шлифование. Общий вид образцов, принятых для исследований представлены на рисунке 3.22.

### 3.1.6 Технологические жидкости

Для исследования вибрационной ОУО деталей использовалась обрабатывающая среда - индустриальное масло И-40 ГОСТ 20799-88. Возможно также применение в качестве рабочей среды минеральных смазочных масел, молекулы которых, представляющие собой длинные углеводородные цепочки, при деструкции распадаются на множество активных фрагментов. Хороший эффект дают следующие масла И-40, И-12А, ТАД-17И, М63/12Г<sub>1</sub>, создающие приращение энергии

активации пластической деформации поверхностных слоев соответственно на 49, 58, 45 и 34 кДж/моль.



Рисунок 3.22 - Общий вид образцов принятых для исследований

Для воздействия на образцы в качестве технологической жидкости были использованы:

- 1)масло индустриальное И-40;
- 2)масло И-40 + металлический порошок;
- 3)вода с содержанием анионных ПАВ (1:100).

### **3.2 Методика проведения экспериментальных исследований**

Экспериментальные исследования включали в себя:

- исследование механизма АООКУС;
- установление влияния режимов АООКУС на параметры ПС после обработки.

### 3.2.1. Методика исследований шероховатости поверхности

Для измерения шероховатости поверхности применялся механический контактный метод. Параметры шероховатости поверхности определялись по системе средней линии (система M), которая соответствует рекомендациям ISO и учтена ДСТУ 2413-94 и ГОСТ 2789-73.

Для исследования использовали плоские и цилиндрические образцы. Измерение параметров и снятие профилограмм осуществлялось с каждого образца по шести точкам до и после обработки.

Базовую длину в настройках профилометра выбрали  $l=2.5$  мм, стандарт- ISO, фильтр RC. Далее располагали датчик TR200 на поверхности образца таким образом, чтобы его «проекция» проходила через точки начала и конца перемещения пера, обозначенные резцом. После этого датчик приводился в движение. Полученные после измерения результаты систематизировались и обрабатывались на персональном компьютере.

Используя прибор в качестве профилографа, с каждого образца снималась профилограмма. Измерение параметров и снятие профилограмм осуществлялось для каждого образца до и после обработки.

Для измерения микропрофиля использовался измерительно-вычислительный комплекс. Комплекс включает следующие элементы: профилограф-профилометр модели TR-200, персональный компьютер, интерфейс связи профилографа с компьютером, пакет прикладных программ. Профилограф - профилометр реализует в комплексе только функции профилографа. Интерфейс связи профилографа с компьютером обеспечивает передачу измерительных сигналов с профилографа в протокол RS-232. Пакет прикладных программ полностью обеспечивает работу оператора при измерении и анализе микрогеометрии на измерительно-вычислительном комплексе.

Контролировались параметры микрогеометрии и форма профиля с использованием кривой Аббота, которая характеризует качество получаемой поверхности. В сечении проводилось 5 измерений (рисунок 3.23).





Рисунок 3.23 - Образец для измерения шероховатости

Контролировались параметры шероховатости обработанной поверхности, оказывающие непосредственное влияние на износостойкость:

- $R_a$  – среднее арифметическое отклонение,
- $S_m$ , средний шаг неровностей профиля;
- $R_p$ , высота наибольшего выступа профиля;
- $R_v$ , глубина наибольшей впадины профиля;
- $t_p$ , относительная опорная длина профиля.

Крайние выпадающие значения отбрасывали, находили средние и записывали в таблицу.

### 3.2.2. Методика измерения маслостойкости ПС

Маслоёмкость поверхности определяли согласно ГОСТ 9.302-88 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля». Метод основан на определении количества масла, адсорбированного ПС. При измерении применяют масло с кинематической вязкостью  $(2,5 - 3,5) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре 25 °С. Образец взвешивали и погружали в масло, нагретое до температуры 130 °С, и выдерживали в нем до температуры  $(20 \pm 5) \text{ °С}$ . Затем образец извлекался, удалялся избыток масла фильтровальной бумагой и взвешивался.

Маслоемкость ( $M$ ) в миллиграммах на квадратный миллиметр вычисляли по формуле:

$$M = \frac{m - m_1}{S}, \quad (3.17)$$

где:  $m$  - масса образца после погружения в масло, мг;  $m_1$  - масса образца до погружения в масло, мг;  $S$  - площадь поверхности образца, мм<sup>2</sup>.

### 3.3 Определение исследуемых факторов влияющих на качество ПС при АООКУС

Производительность процесса АООКУС зависит от АЧХ колебаний деталей, исходной шероховатости, вида предшествующей обработки, технологической наследственности, характеристик рабочей среды, физико-механических свойств обрабатываемого материала и режимов обработки. На начальном этапе планирования эксперимента было необходимо составить матрицу отсеивающего эксперимента и провести эксперимент для определения малозначащих факторов. Все факторы, воздействующие на обработку разбиваем по следующим группам:  $X$  – управляемые факторы, которые влияют на АООКУС;  $Z$  – неуправляемые;  $Y$  – отклик.

Факторы, оказывающие влияние на АООКУС представлены в таблице 3.5.

Для выявления наиболее значимых факторов необходимо провести отсеивающий эксперимент на основе плана Плакетта–Бермана. Выбранный план является одним из самых экономичных по числу опытов и эффективным для дисперсионного анализа. В данном случае необходимо будет провести  $N=12$  экспериментов для 11 факторов. Поэтому к 9 существующим факторам были добавлены 2 фиктивных фактора. Факторы будут варьироваться на трёх уровнях +1, 0 и –1.

В таблице 3.6 представлены уровни каждого фактора.

Таблица 3.5 – Факторы оказывающие влияние на процесс АООКУС

№	Классификация фактора	Расшифровка фактора
1	$X_1$	Исходная микротвердость ПС
2	$X_2$	Исходная шероховатость ПС
3	$X_3$	Время обработки
4	$X_4$	Способ предварительной обработки
5	$X_5$	амплитуда колебаний
6	$X_6$	Тип концентратора
7	$X_7$	Объём ванны с рабочей средой
8	$X_8$	Химический состав технологической жидкости
9	$X_9$	Вязкость технологической жидкости
10	$Z_1$	Температура окружающей среды
11	$Y_1$	Микротвердость ПС
12	$Y_2$	Среднее арифметическое отклонение профиля $R_a$
13	$Y_3$	Средний шаг неровностей $S_m$
14	$Y_4$	Относительная опорная длина профиля $t_p$

Таблица отсеивающего эксперимента по плану типа Плакетта–Бермана представлена в таблице 3.7.

В результате расчетов были отсеяны малозначащие факторы. Для дальнейшего проведения эксперимента выделено 4 фактора: время обработки, тип концентратора, материал, состав технологической жидкости.

### 3.4 Структура проведения экспериментов

Перед началом исследований каждый образец протирался, взвешивался на электронных весах, измерялись номинальные размеры, и определялась шероховатость поверхности профилометром-профилографом TR-200 .

Шероховатость определялась по трем сечениям, 7 измерений.

Таблица 3.6 - Уровни варьируемых факторов

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

Обрабатывался каждый образец отдельно. Образцы обрабатывались 1мин, 2..15 минут. Снимали образец. Вытирали, взвешивали, и с помощью профилометра с поверхности записывали 5-7 профилограмм длиной 2-3 мм по предварительно намеченным траекториям. После этого определялась микротвердость и маслоёмкость ПС.

Анализ параметров шероховатости поверхности образцов проводился по параметрам  $R_a$ ,  $S_m$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $t_p$ .

С помощью металлографического микроскопа наблюдалась топография поверхности после АООКУС.

С целью обоснования зависимостей, характеризующих процесс АООКУС, в ходе экспериментальных исследований устанавливались:

- частота генерируемого сигнала;
- частота и амплитуда колебаний детали;

Таблица 3.7 - Таблица отсеивающего эксперимента

Опыт/Код	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	Y <sub>1</sub>
1	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	
2	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	
3	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	
4	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	
5	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	
6	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	
7	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	
8	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	
9	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	
10	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	
11	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

- эффективное время обработки;
- параметры шероховатости ПС;
- микротвердость ПС.

Экспериментальные исследования проводились в следующей последовательности:

1. Образцы протирались, нумеровались, взвешивались. Измерялись номинальный размер и параметры шероховатости каждого образца, снималась опорная кривая (рисунок 3.24, таблица 3.8 - 3.9).

2. Образец закреплялся на концентраторе № 1 ЗКС. На образце закреплялся вибродатчик типа ДН-3, ДН-4, ДН-5 (рисунок 3.25).

3. Снималась АЧХ собственных колебаний образцов с помощью ДН-3 и программы Пауэр-граф (рисунок 3.26).

4. Снималась АЧХ вынужденных резонансных колебаний образцов. По АЧХ наблюдался резонанс. Как правило, наибольшая амплитуда наблюдалась на

второй гармонике (рисунок 3.27).

5. Подставлялась ванна с рабочей средой (рисунок 3.28).
6. Произведена обработка на резонансных частотах от 2 до 15 минут.
7. После каждой минуты обработки снимались показания микротвердости и шероховатости (таблица 3.10).

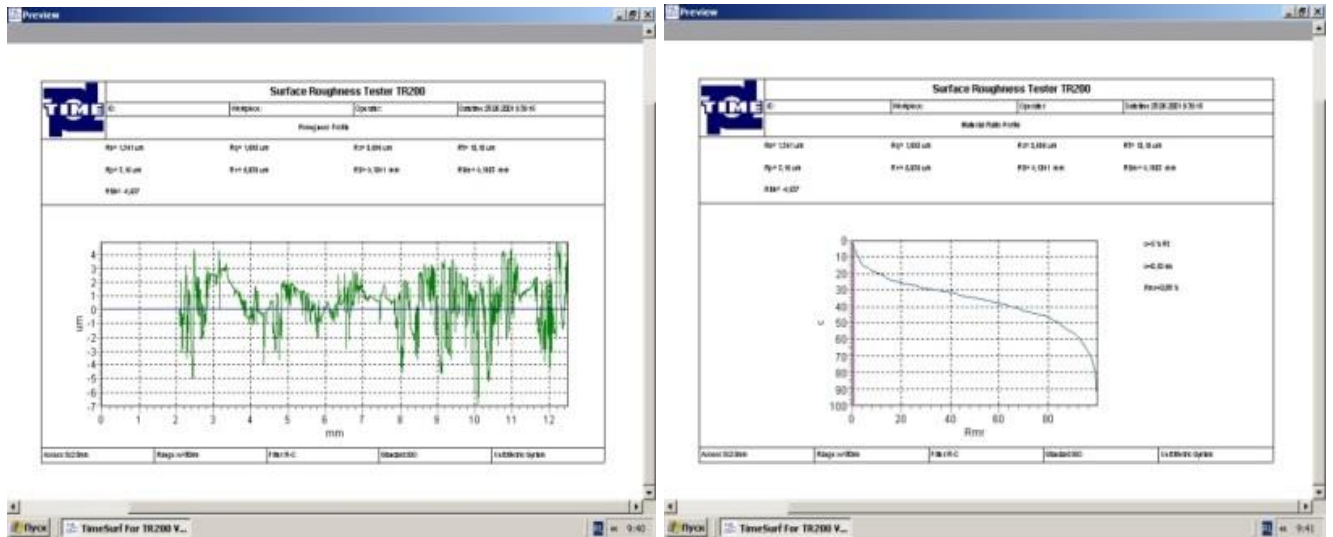


Рисунок 3.24 - Профилограмма ПС



Рисунок 3.25 - Положение заготовки при снятии АЧХ

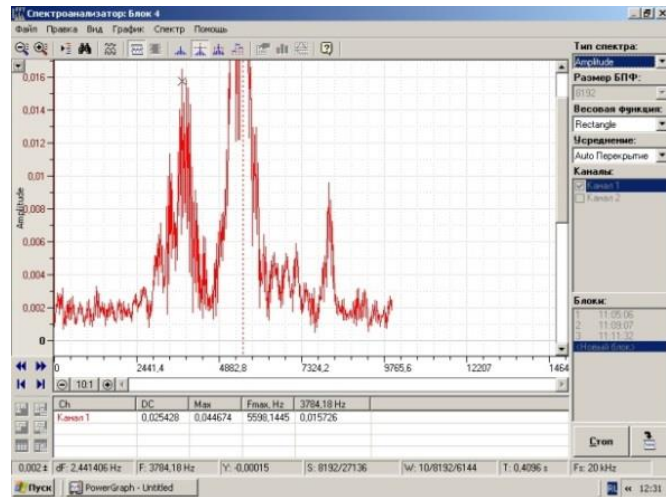


Рисунок 3.26 - АЧХ собственных колебаний детали

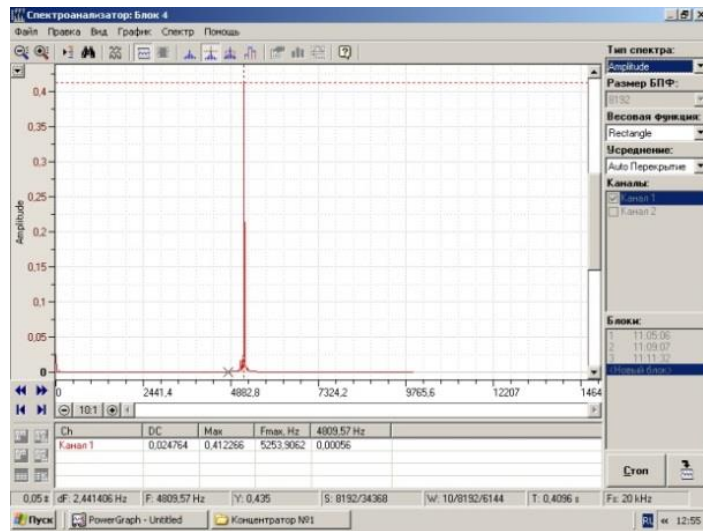


Рисунок 3.27 - Амплитудно-частотная характеристика ВК



Рисунок 3.28 - Положение образца во время проведения эксперимента.

### **Выводы по третьему разделу**

1. Разработана вибрационная установка для АООКУС, позволяющая производить обработку деталей в квазиупругих средах в резонансном режиме звукового частотного диапазона колебаний в пределах от 727 Гц до 8000 Гц.

2. Разработан электронный генератор звуковых колебаний с потребляемой мощностью 0,4 кВт.

3. Разработана общая методика экспериментальных исследований АООКУС, методика выбора технологических параметров обработки и методика измерений параметров качества обрабатываемой поверхности.

4. Выполнен отсеивающий эксперимент по плану типа Плакетта–Бермана и определены факторы, влияние которых на процесс обработки нужно исследовать при проведении основного эксперимента.

5. Выбраны параметры факторов влияющих на процесс обработки и подлежащих исследованию.



## РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА АООКУС НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПС

### 4.1. Планирование эксперимента

Экспериментальные исследования посвящены проведению АООКУС деталей и определению изменения качества ПС. Ставится задача определить влияние режимов обработки, состава рабочей среды и конструкции концентратора на параметры ПС, определяющие срок службы деталей.

Главной целью экспериментальных исследований являлось определение рациональных режимов обработки. В предыдущей главе были определены факторы влияющие на процесс обработки: время обработки, исходные значения параметров шероховатости ПС, форма и размеры концентратора, характеристика технологической жидкости, форма и материал детали. Во время проведения эксперимента мы можем управлять только временем обработки. Форма и размеры концентратора определяются исходя из материала и формы детали. Уровни варьирования факторов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Уровни факторов

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	

Матрица планирования полного двухфакторного эксперимента представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Матрица планирования эксперимента  $3^2$ 

Номер опыта	$X_1$	$X_2$
1	+	+
2	+	0
3	+	-
4	-	+
5	-	0
6	-	-
7	0	+
8	0	0
9	0	-

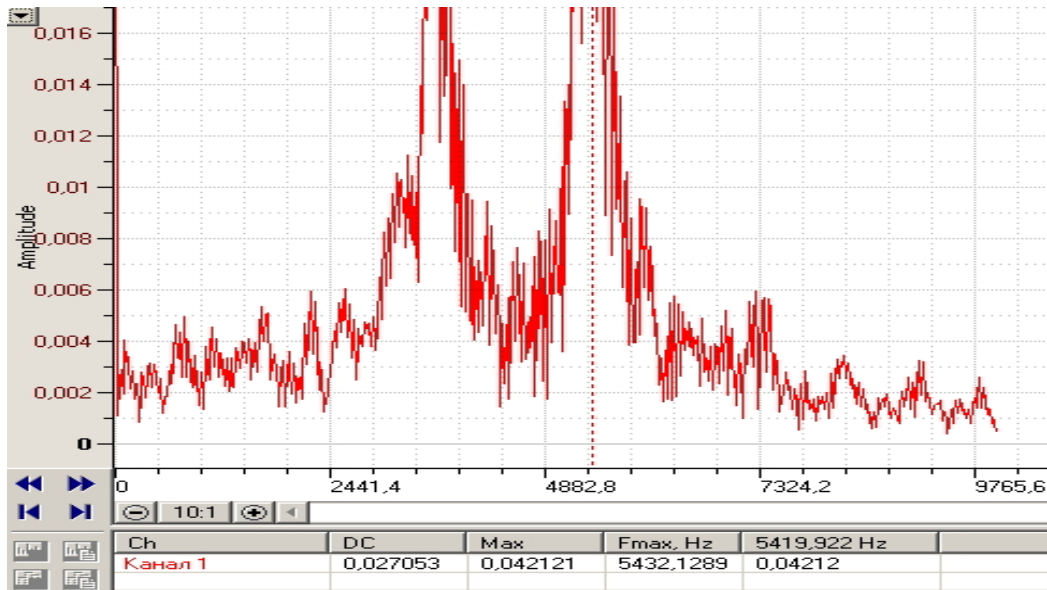
#### 4.2. Исследование АЧХ собственных колебаний и вынужденных колебаний детали в резонансном режиме

В условиях резонанса амплитуда вынужденных колебаний резко увеличивается. При этом извне затрачивается минимум энергии на поддержание резонанса, а внутрь системы поступает максимум подводимой энергии. Для проверки производительности вынужденных резонансных колебаний снимались АЧХ собственных (СК) и вынужденных (ВК) колебаний детали, при частоте импульсов генератора поступающих на ЗКС от 0,5 до 8 кГц, с шагом 0,5 кГц. В качестве образца использовалась деталь цилиндрической формы, материал - Ст 45. Испытания проводились для двух концентраторов ЗКС различной формы, цилиндрическо-профилированного (№1) и конусного (№2).

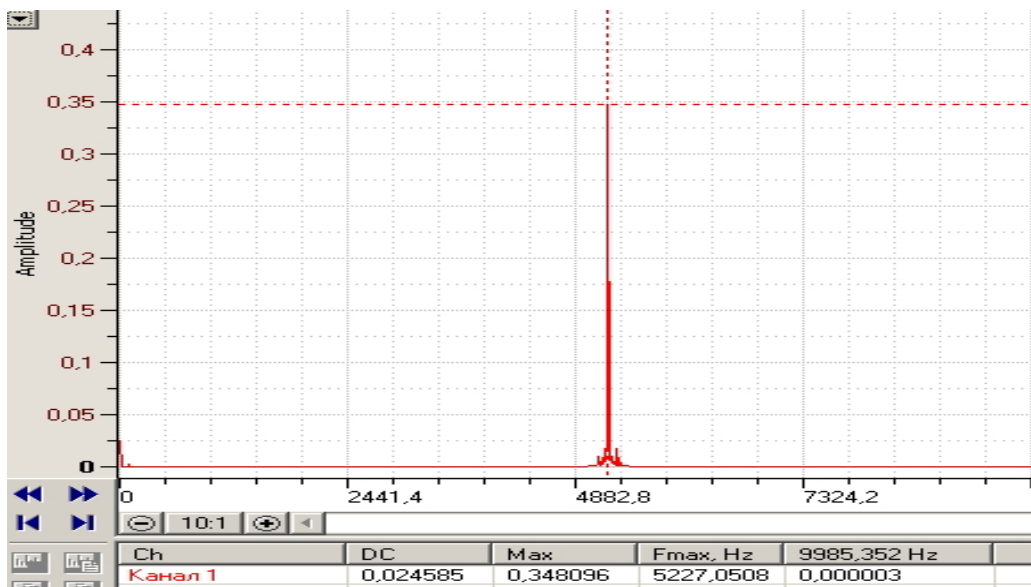
Вид АЧХ детали при вынужденных и собственных колебаниях представлен на рисунке 4.1. Совпадение частоты ВК с частотой СК системы подтверждает обработку в резонансном режиме.

Результаты измерений частоты и амплитуды вынужденных и собственных колебаний образцов из различных материалов, при закреплении на разных кон-

центраторах представлены в представлены в приложении П2.



а)



б)

Рисунок 4.1. АЧХ детали: а) СК; б) ВК.

АЧХ СК и ВК деталей, из различных материалов, при закреплении на концентраторах №1 и №2 представлены на рисунках 4.2 и 4.3 соответственно.

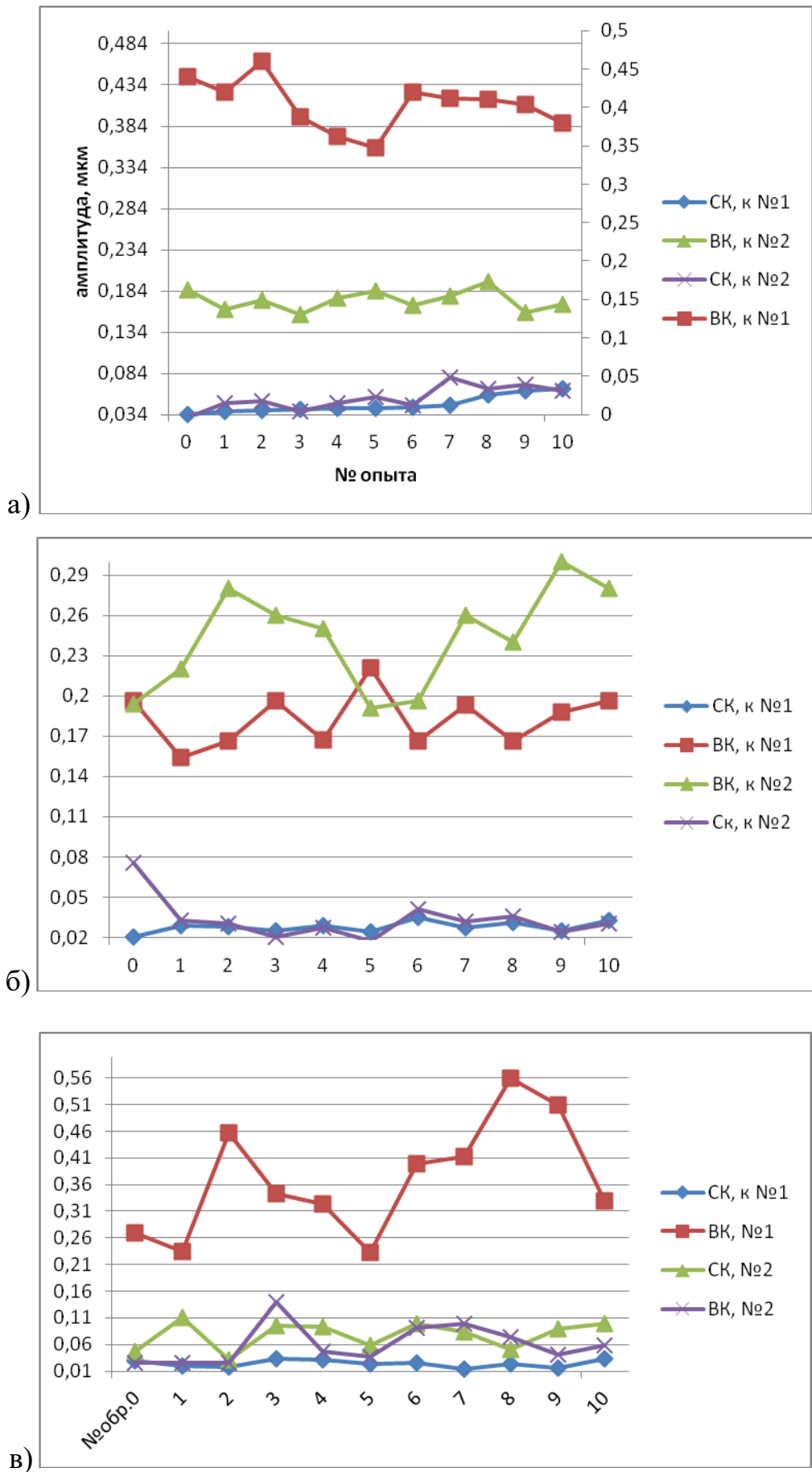


Рисунок 4.2 - Амплитуда колебаний деталей: а) из Д16; б) из ЛС63; в) из Ст40.

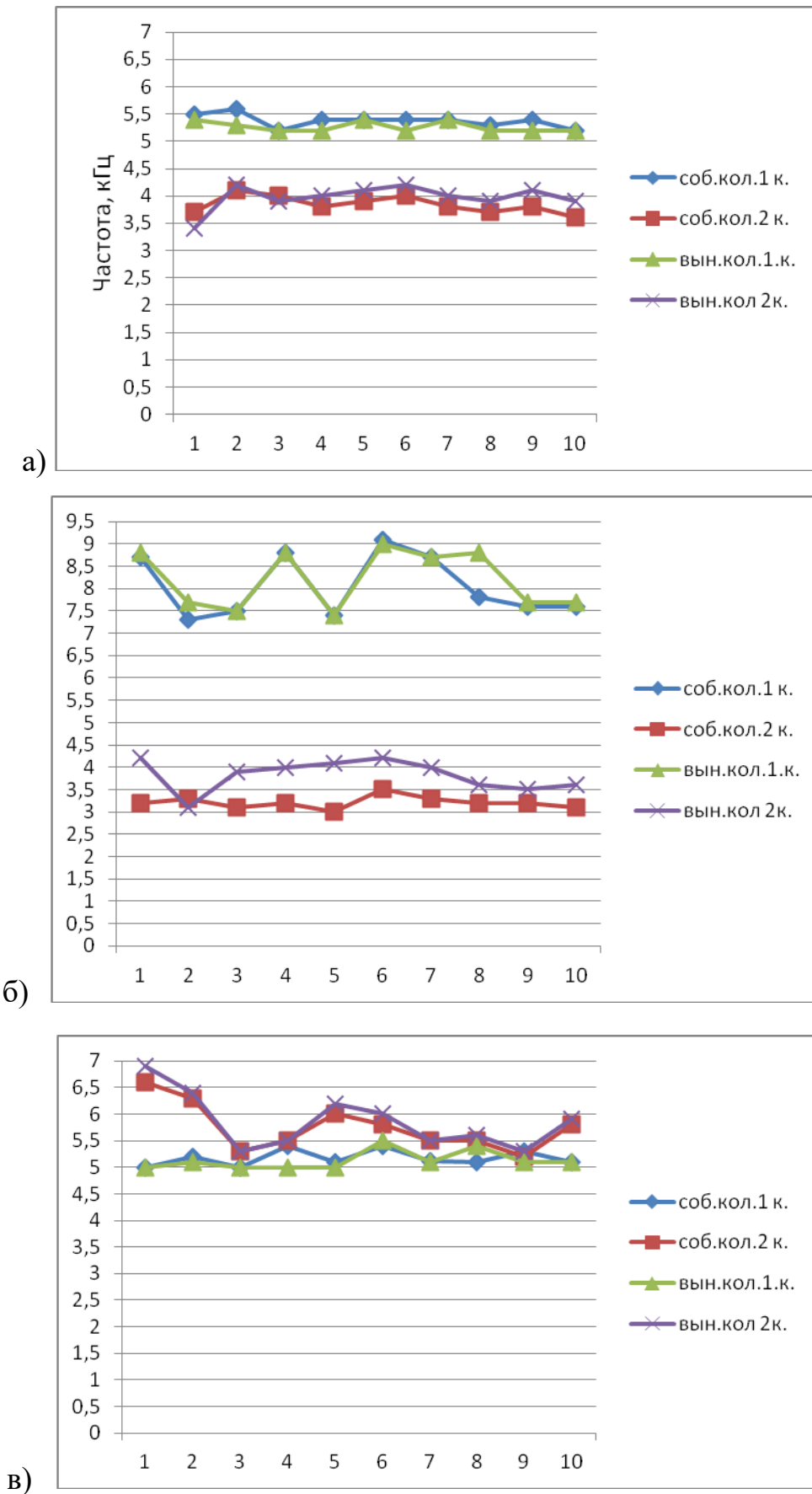


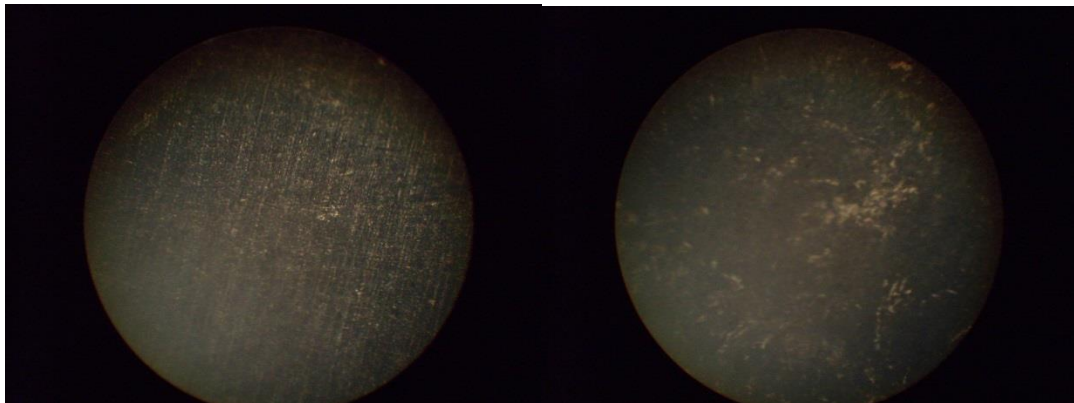
Рисунок 4.3 - Частота колебаний деталей: а) из Д16; б) из ЛС63; в) из Ст40.

Исходя из результатов эксперимента, по определению влияния конструкции концентратора на амплитудно-частотные характеристики процесса, можно сделать следующие выводы: наибольшая амплитуда вынужденных 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 правильность математического обеспечения расчета геометрических параметров концентратора.

### 4.3 Топография ПС

Топография поверхностей образцов, изготовленных из Ст45, до и после испытания, изучалась на металлографическом микроскопе.

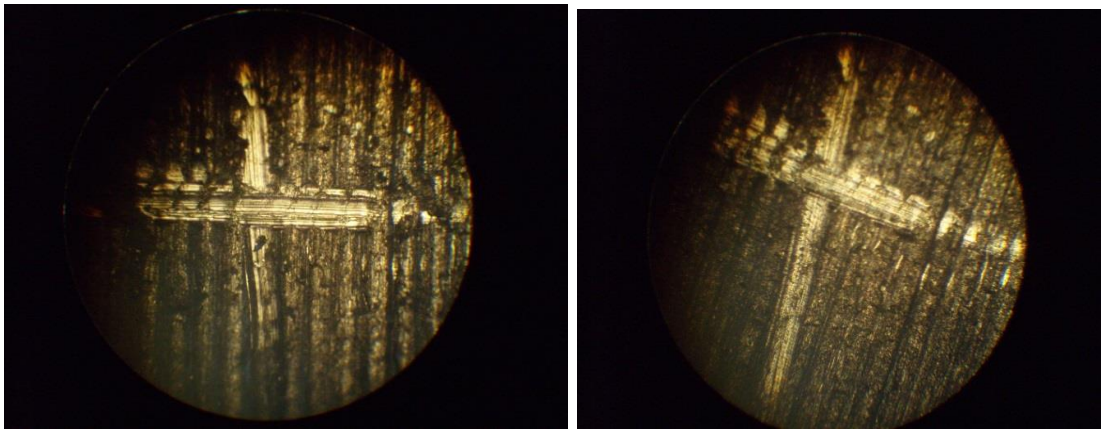
Резонансная виброобработка в квазиупругой среде позволяет получить топографию обрабатываемой поверхности близкую к рациональной (эксплуатационной). Получаемый рельеф ПС обеспечивает: высокую фактическую площадь контакта; минимальную удельную нагрузку на поверхность, вследствие увеличения опорной длины профиля; рациональную маслоёмкость поверхности, за счёт большого количеству микровпадин с плавными краями; и соответственно высокую износостойкость деталей. Снимки топографии поверхности до и после обработки представлены на рисунках 4.4-4.9.



а)

б)

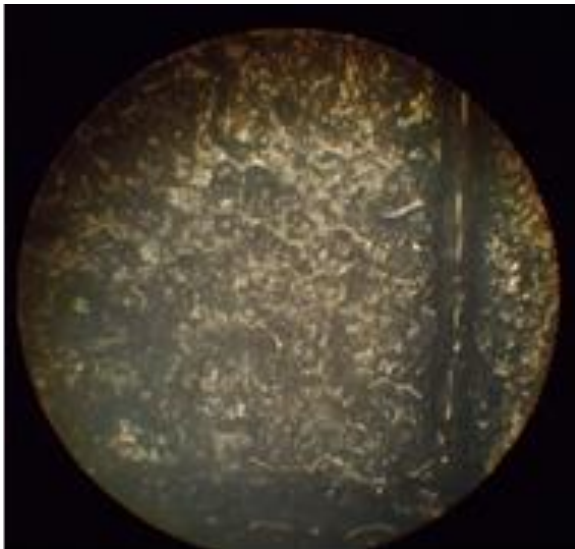
Рисунок 4.4 - Топография цементированной поверхности, Ст 40Х (1:500)



а)

б)

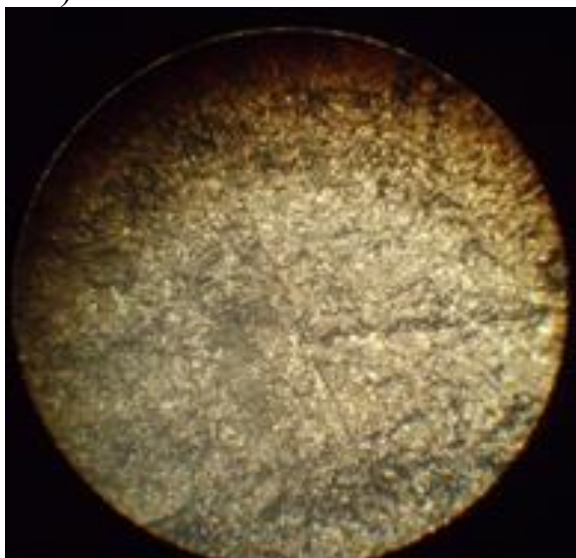
Рисунок 4.5 - Топография поверхности Ст 45 после точения (1:500)



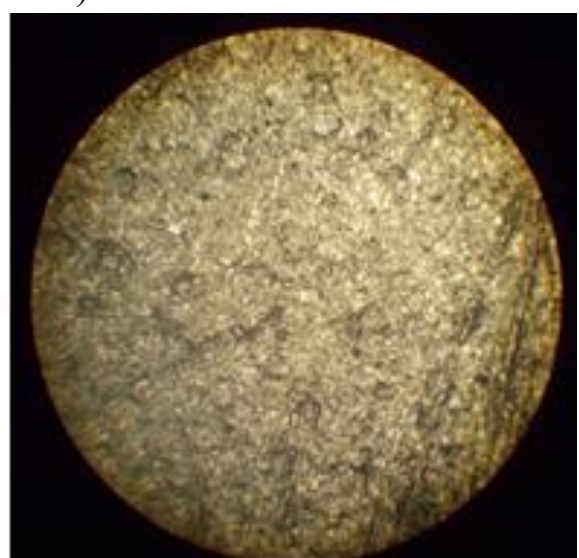
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.6 - Топография поверхности Д16 (1:500): а) до обработки; б) 5 минут обработки; в) 10 минут обработки; г) 15 минут обработки.

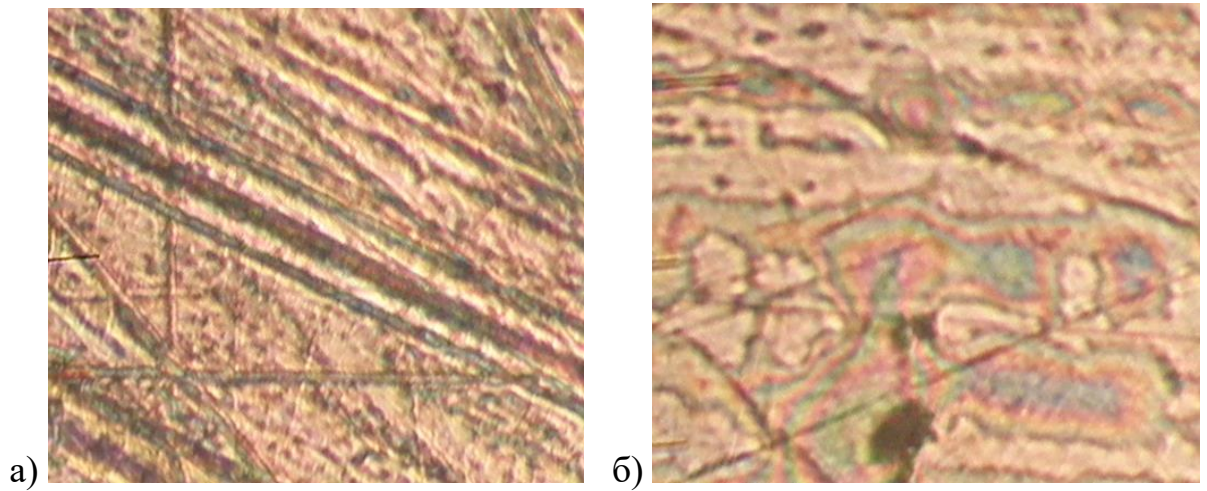


Рисунок 4.7 - Топография поверхности пластины АЛ8 после полирования:

а) исходная; б) после обработки,  $t=10$  мин.

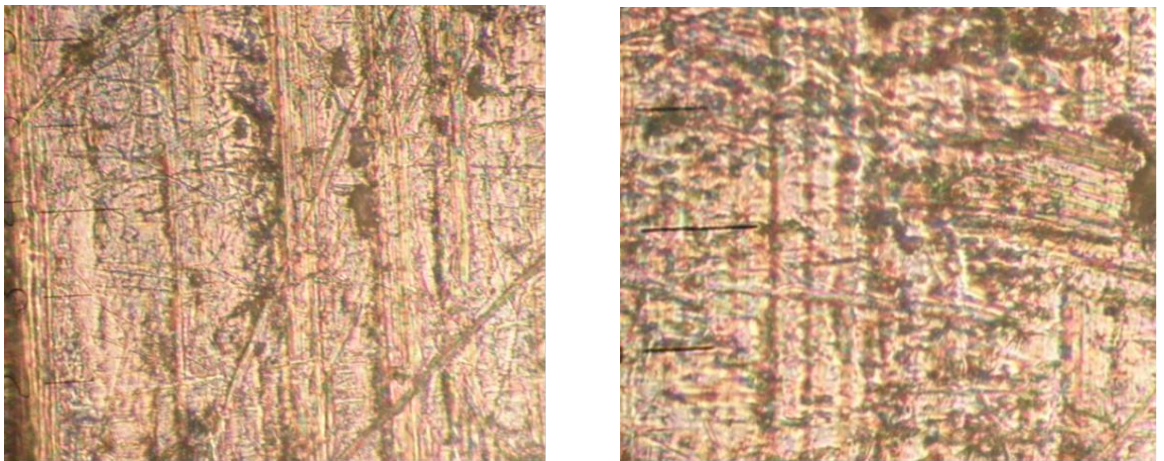


Рисунок 4.8 - Топография поверхности пластины АЛ8 холодный прокат:

а) исходная; б) после обработки,  $t=10$  мин.



Рисунок 4.9 - Топография поверхности пластины Ст 40 после обработки:

а) в масле-И40; б) в масле И-40+порошок.



Обработанные детали (полирование +АООКУС) имеют поверхность с зеркальным блеском без следов предыдущей операции, царапин, прожогов, шагреновых участков и других дефектов.

При этом наблюдается образование рабочих поверхностей с субмикрорельефом, залечивающим дефектные зоны.

#### 4.4 Микротвёрдость

Целью исследований было влияние АООКУС на микротвёрдость ПС. При этом использовался микроструктурный метод исследований.

Таблица 4.3 - Микротвердость для АЛЮ после обработки на резонансной частоте 3800 Гц, НРВ

№	Вид среды	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 с ПАВ	74	78.25	82	81

После обработки пластин в индустриальном масле, были замечены изменения ПС пластин. Твёрдость ПС увеличилась от 72...76 НВ до 81...86 НВ.

#### 4.5. Исследования микротвердости образца пластины 150x30x2 мм, Сталь 40 , резонанс $f=2500$ Гц

По полученным данным построены графические зависимости твердости поверхности от времени обработки (рисунок 4.10- 4.15).

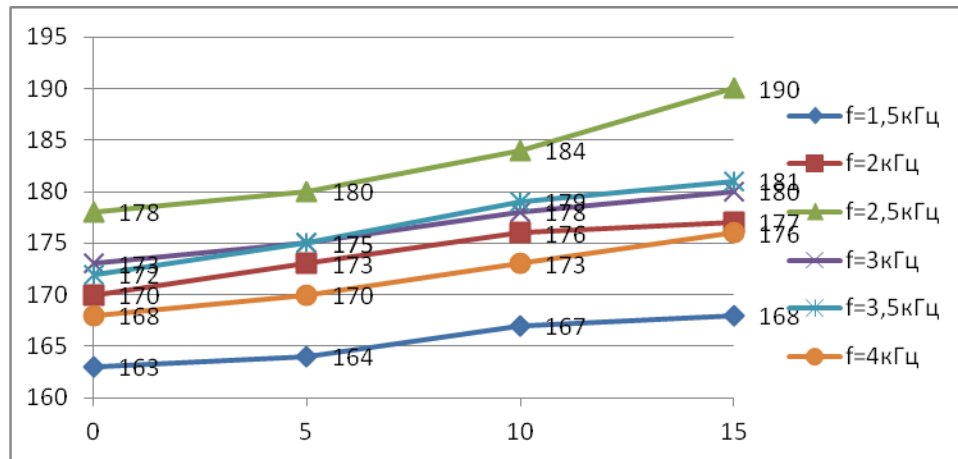


Рисунок 4.10 - Зависимости твердости ПС от времени обработки в рабочей среде масло И-40

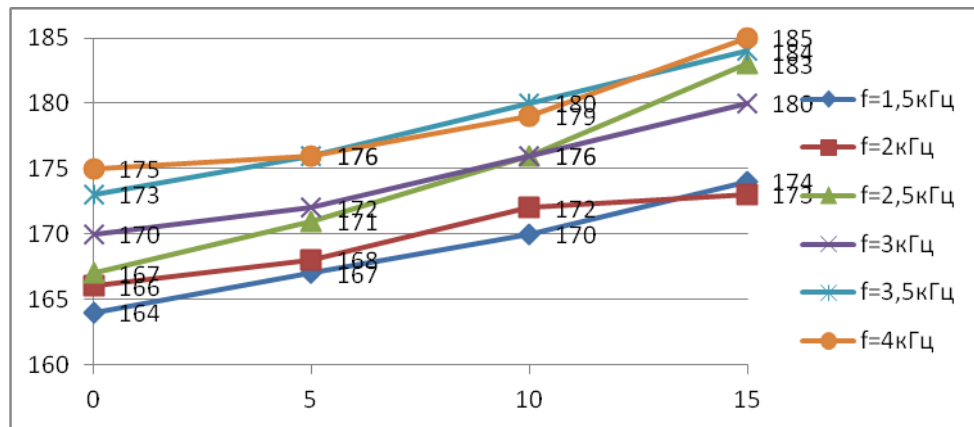


Рисунок 4.11 - Зависимости твердости ПС от времени обработки в рабочей среде масло И-40 + порошок

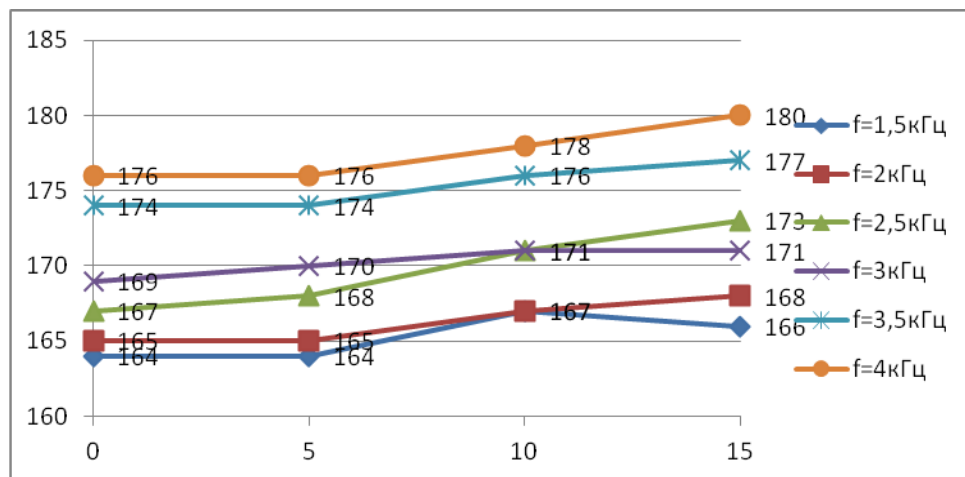


Рисунок 4.12 - Зависимости твердости ПС от времени обработки в рабочей среде вода +ПАВ

Рассмотрев и сравнив полученные графические зависимости, можно сделать следующие выводы:

- самый большой эффект наблюдается при обработке в резонансной частоте, и на протяжении 10 минут, хотя не исключено, что при увеличении времени значения твердости будет продолжать возрастать или наоборот уменьшаться, но менее стремительно;

- увеличение объема рабочей среды положительно влияет на твердость обрабатываемой поверхности, в то время как на показатели шероховатости такое влияние имеет уменьшение объема. Следовательно, для достижения рациональных показателей твердости и качества поверхности необходимо найти оптимальное значение объема;

- наибольшее увеличение твердости происходит в резонансном режиме.

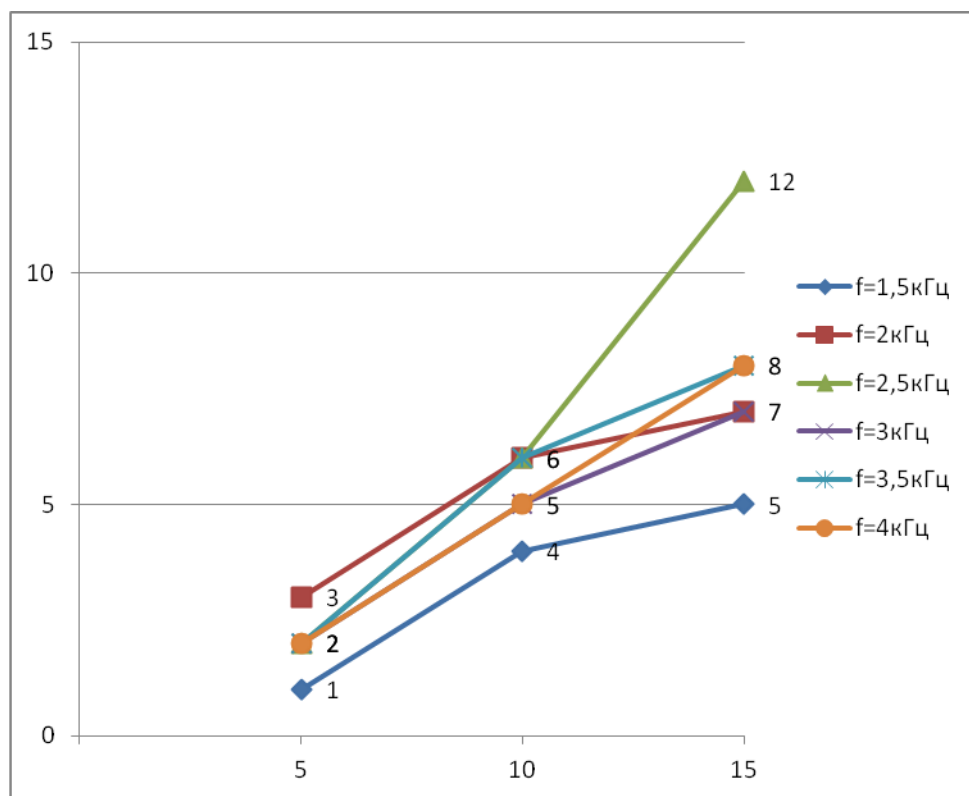


Рисунок 4.13 - Зависимости увеличения твёрдости поверхности от времени обработки в рабочей среде масло И-40

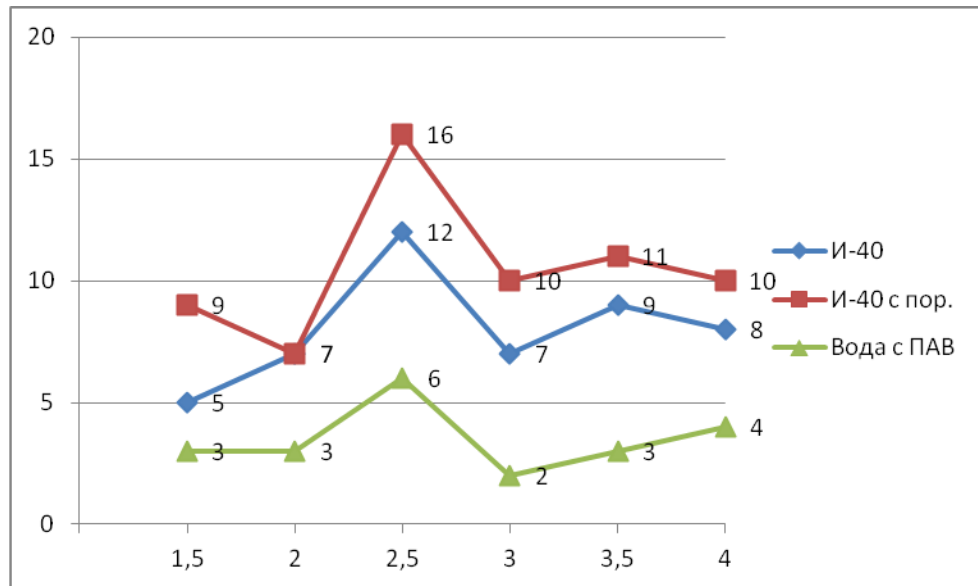


Рисунок 4.14 - Зависимости увеличения твёрдости поверхности от частоты обработки, при времени обработки  $t=15$  мин.

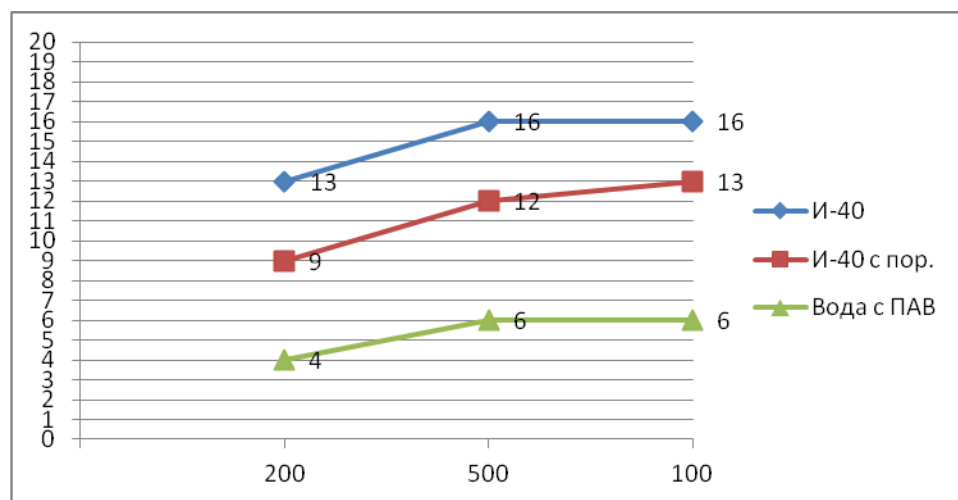


Рисунок 4.15 - Зависимости твёрдости поверхности от объёма среды

#### 4.6 Исследования микротвёрдости образца пластины 150x30x3 мм, дюралюминий, резонанс $f=2500$ Гц

В качестве образцов используются пластины длиной 150 мм, шириной 30 мм, толщиной 3 мм из материала – дюралюминий. Образцы выполнены с различными шероховатостями.

Для анализа экспериментальных исследований, рассмотрим влияние времени обработки и частоты колебаний на качество ПС (рисунок 4.16-4.19).

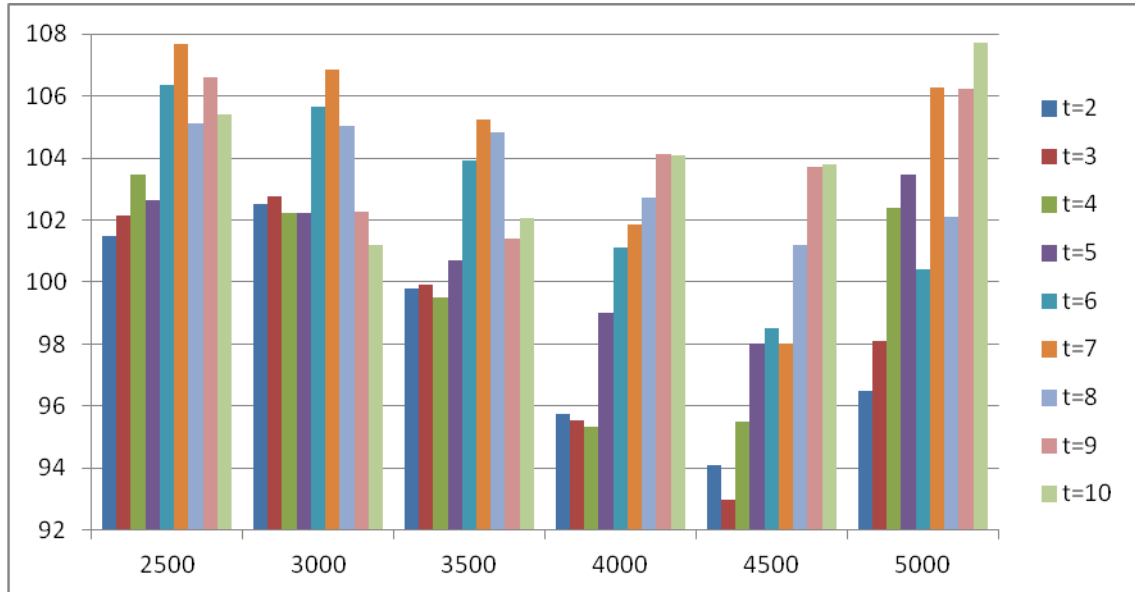


Рисунок 4.16 - Зависимость твердости образцов от частоты звуковых колебаний при обработке упругой среды И-40

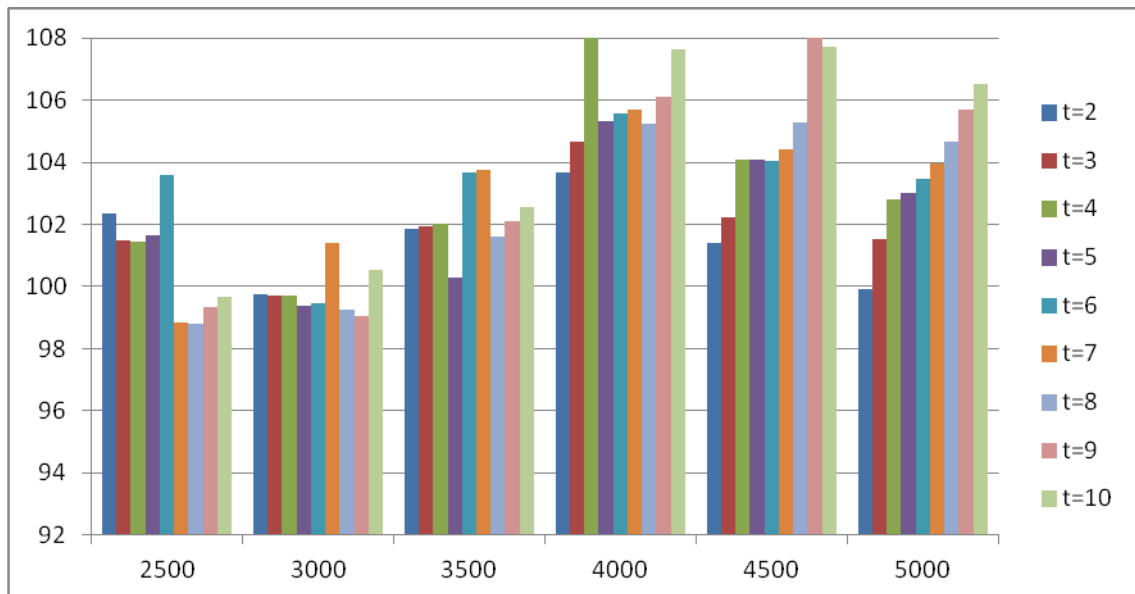


Рисунок 4.17 - Зависимость твердости образцов от частоты звуковых колебаний при обработке в масле И-40 + порошок

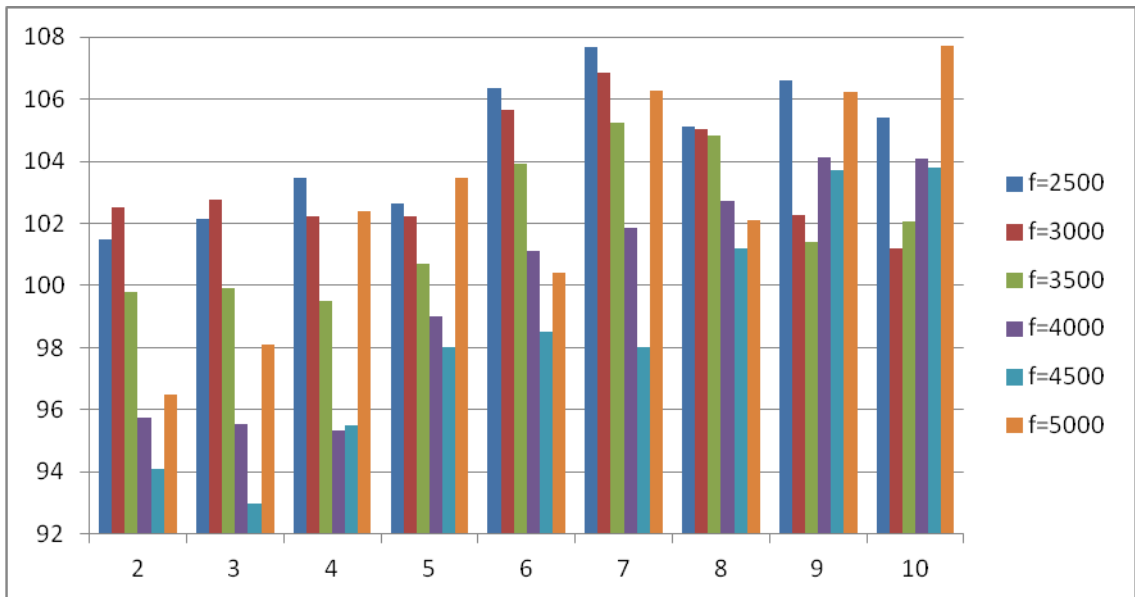


Рисунок 4.18 – Зависимость твердости образцов от времени воздействия частоты звуковых колебаний при обработке в масле И-40

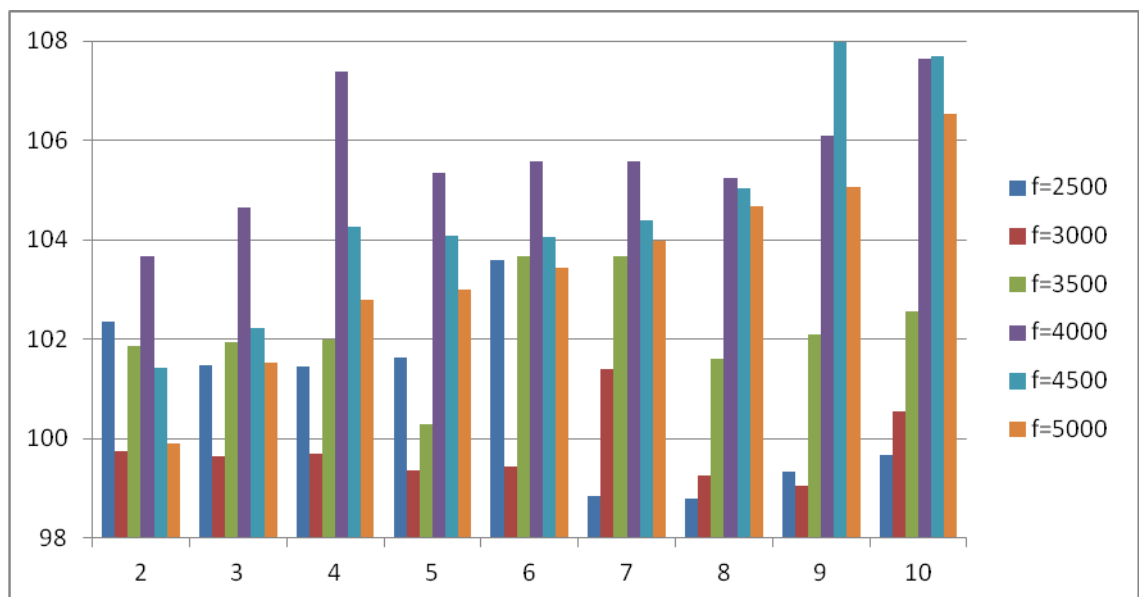


Рисунок 4.19 Зависимость твердости образцов от времени воздействия частоты звуковых колебаний при обработке в масле И-40 + порошок

Из зависимостей, видно, что входные параметры по-разному влияют на показатели качества обрабатываемой поверхности.

Анализируя результаты экспериментальных исследований, можно сделать выводы, что применение АООКУС действительно приводит к повышению твер-

дости и снижению шероховатости поверхности деталей. Наиболее рациональной является обработка в резонансном режиме.

#### 4.7. Зависимость амплитудно-частотной характеристики колебаний детали в зависимости от частоты сигнала генератора

АЧХ колебаний детали снимались при частоте импульсов генератора поступающих на УКС от 0,5 до 8 кГц, с шагом 0,5 кГц. В качестве образца использовалась деталь цилиндрической формы, материал-сталь 45. Испытания проводились для двух концентраторов УКС различной формы, конусного (№2) и цилиндрическо-профилированного (№1).

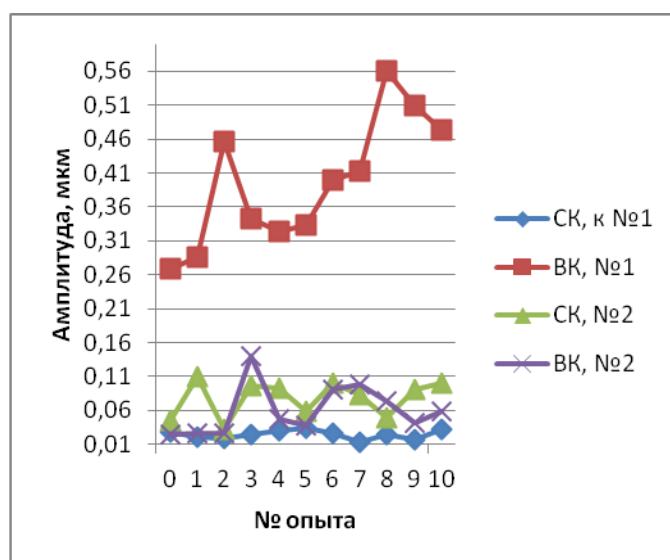


Рисунок 4.20 - Зависимость амплитуды СК и ВК от вида концентратора

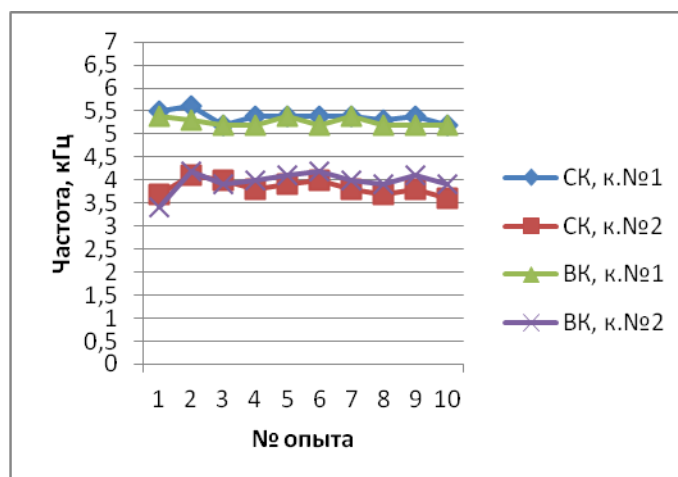


Рисунок 4.21 - Зависимость частоты СК и ВК от вида концентратора

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

- АЧХ ЗКС при разных концентраторах различны;
- АЧХ при разных значениях импульсов генератора совпадают по частотным значениям пиков, но отличаются по значениям амплитуды на пиках.

#### 4.8. Зависимость высотных и шаговых параметров шероховатости от режимов обработки

##### 4.8.1. Исследования шероховатости образца пластины 150x30x2 мм, Сталь 40 , резонанс $f=2500$ Гц

Графические зависимости шероховатости от режимов обработки представлены на рисунках 4.22-4.26. В качестве параметра шероховатости принят параметр  $R_a$ .

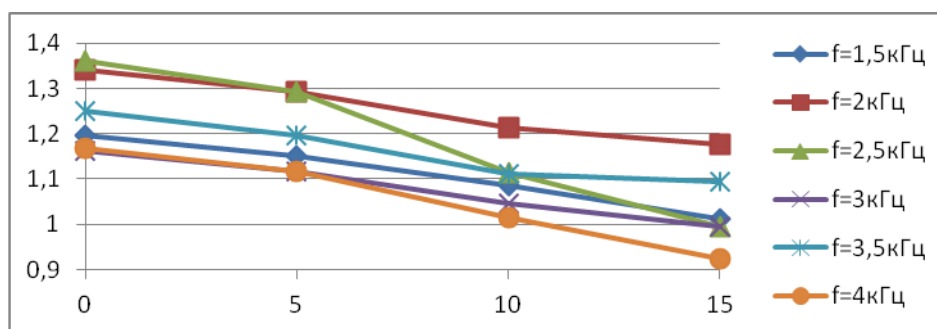


Рисунок 4.22 - Зависимости шероховатости поверхности от времени обработки в масле И-40

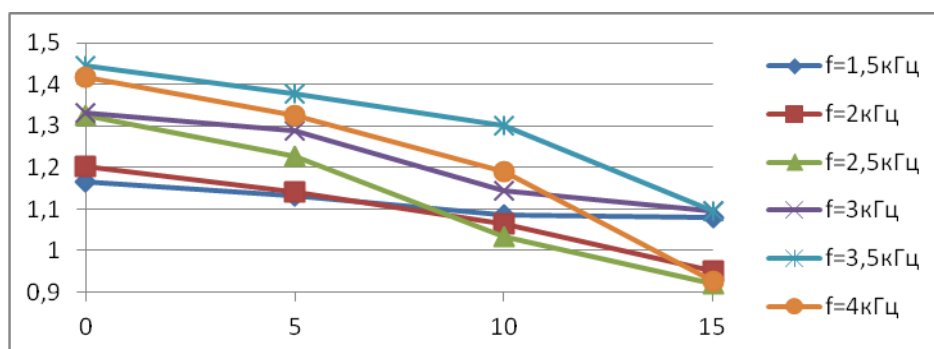


Рисунок 4.23 - Зависимости шероховатости поверхности от времени обработки в рабочей среде – масле И-40+ порошок



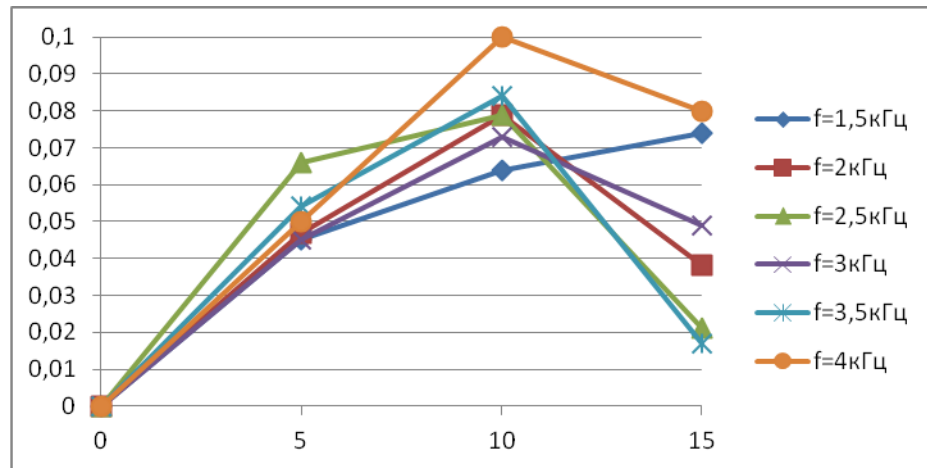


Рисунок 4.24 - Зависимости уменьшения шероховатости поверхности от частоты обработки при обработке И40

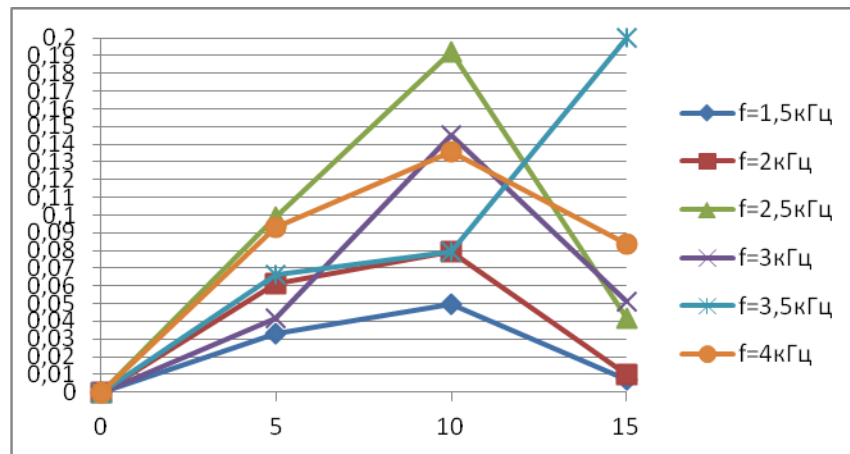


Рисунок 4.25 - Зависимости уменьшения шероховатости поверхности от частоты обработки при обработке И40 + порошок

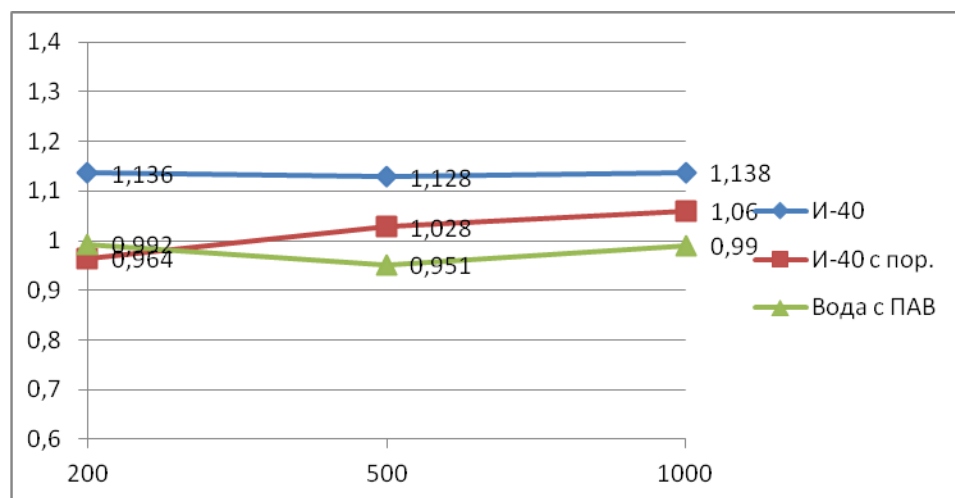


Рисунок 4.26 - Зависимости шероховатости ПС от объёма рабочей среды

#### 4.8.2 Исследования шероховатости образца пластины 150x30x3 мм, дюралюминий, резонанс $f=2500$ Гц

В качестве образцов используются пластины длиной 150 мм, шириной 30 мм, толщиной 3 мм из материала – дюралюминий. Образцы выполнены с различными шероховатостями (одни были обработаны абразивной шкуркой из зерен крупной фракции, другие – абразивной шкуркой из зерен мелкой фракции).

Таблица 4.4 - Результаты измерений шероховатости поверхности пластин после обработки в упругой среде И-40, мкм

Номер опыта	Объем масла, мл	Частота, Гц	Время воздействия резонансной частоты, мин			
			0	2	5	10
1	500	2500	1,615	1,540	1,440	1,210
2		3500	1,760	1,580	1,470	1,290
3		5000	1,36	1,24	1,19	1,082

Таблица 4.5 - Результаты измерений шероховатости поверхности пластин после обработки в упругой среде И-40 + порошок, мкм

Номер пластины	Объем масла, мл	Частота, Гц	Время воздействия резонансной частоты, мин			
			0	2	5	10
1	500	2500	1,47	1,35	1,20	1,02
2		3500	1,60	1,38	1,28	1,045
3		5000	1,18	1,09	1,00	0,770

Таблица 4.6 – Зависимость шероховатости поверхности образцов от частоты звуковых колебаний при объеме упругой среды И-40

Частота звуковых колебаний, Гц	Время воздействия частоты звуковых колебаний, мин								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2500	1,50	1,35	1,33	1,10	1,05	1,00	1,03	0,85	0,80
3000	1,30	1,20	1,15	1,10	1,10	1,10	1,05	1,00	1,00
3500	1,15	1,10	1,10	1,00	1,05	1,04	0,95	0,90	0,90
4000	1,15	1,14	1,12	1,07	1,08	1,06	1,05	1,04	1,01
4500	0,95	0,95	0,96	0,9	0,88	0,86	0,83	0,81	0,79
5000	0,98	0,94	0,90	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,72

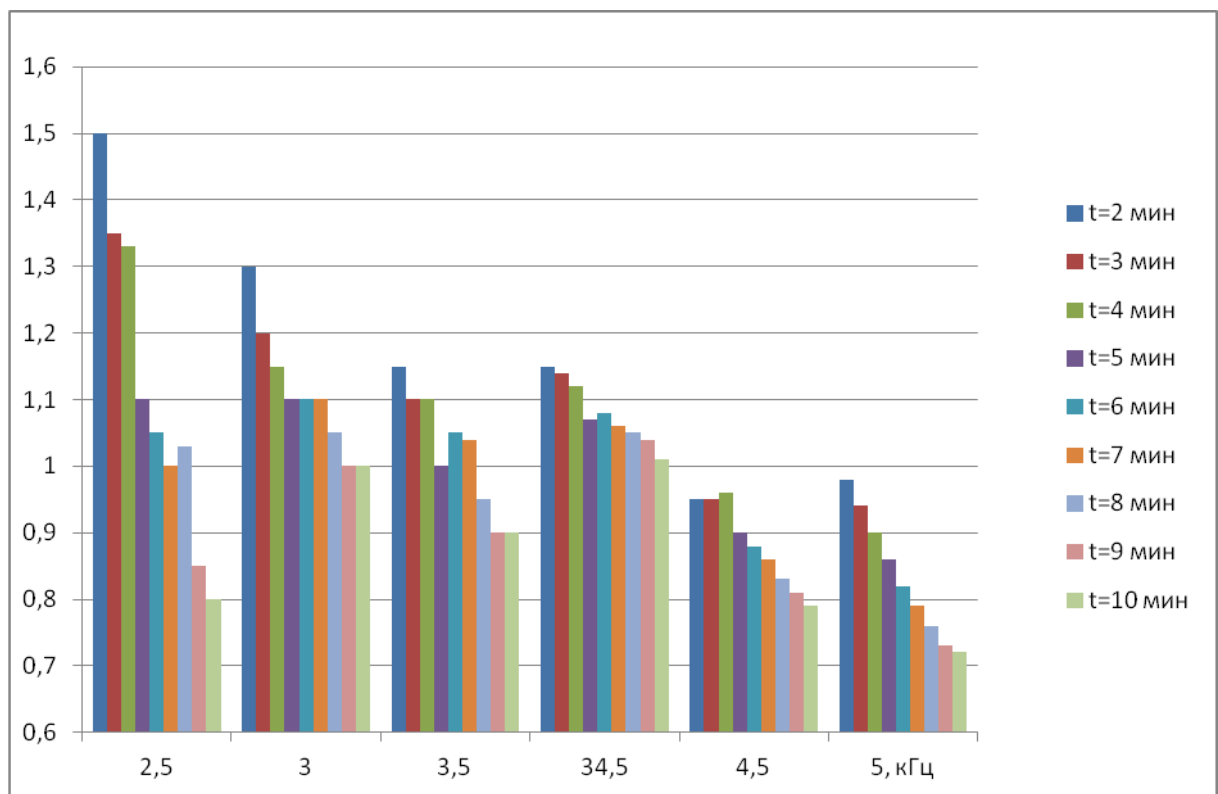


Рисунок 4.27. Зависимость шероховатости поверхности образцов от частоты звуковых колебаний при обработке в упругой среде И-40

Таблица 4.7 - Зависимость шероховатости поверхности образцов от частоты звуковых колебаний при объеме упругой среды И-40 + порошок

Частота звуковых колебаний, Гц	Время воздействия частоты звуковых колебаний, мин								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2500	1,23	1,21	1,14	0,99	0,97	0,95	0,97	0,93	0,9
3000	1,37	1,33	1,36	1,25	1,20	1,20	1,18	1,06	0,98
3500	1,49	1,43	1,34	1,27	1,25	1,20	1,19	1,16	1,13
4000	1,26	1,24	1,23	1,20	1,13	1,11	1,09	1,08	1,07
4500	1,18	1,17	1,15	1,14	1,08	1,03	1,02	1,00	0,99
5000	1,05	1,02	0,99	0,94	0,89	0,79	0,76	0,73	0,71

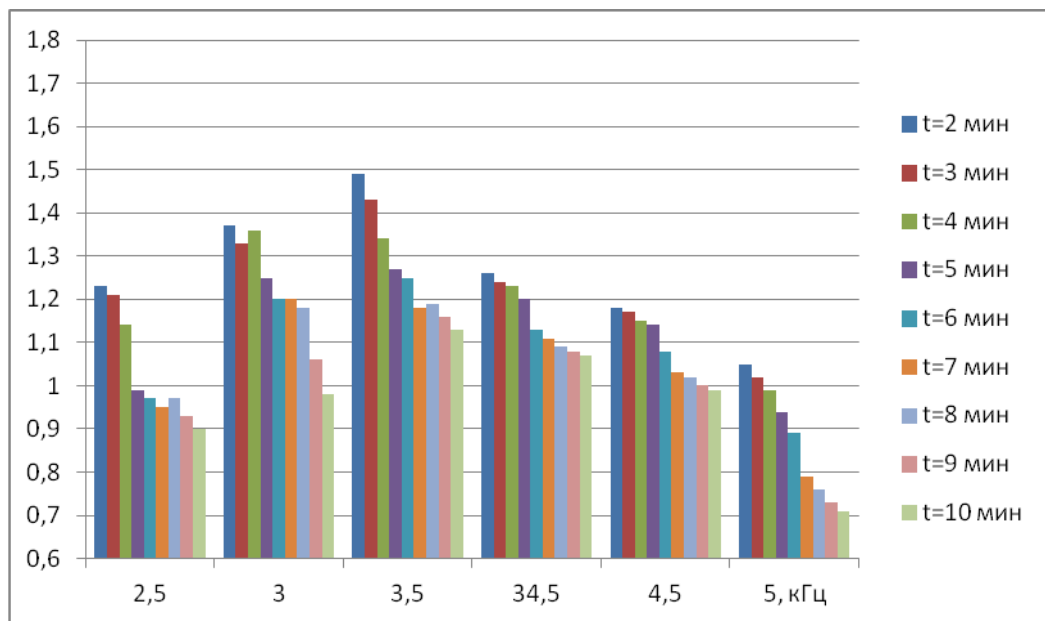


Рисунок 4.28 - Зависимость шероховатости поверхности образцов от частоты звуковых колебаний при объеме упругой среды И-40 + порошок

Из зависимостей, видно, что на конечный результат эксперимента влияние входных параметров в каждом опыте было разное. Поэтому, чтобы детально проанализировать наши экспериментальные исследования, рассмотрим влияние времени воздействия частоты звуковых колебаний на образцы (рисунок 4.29-4.30).

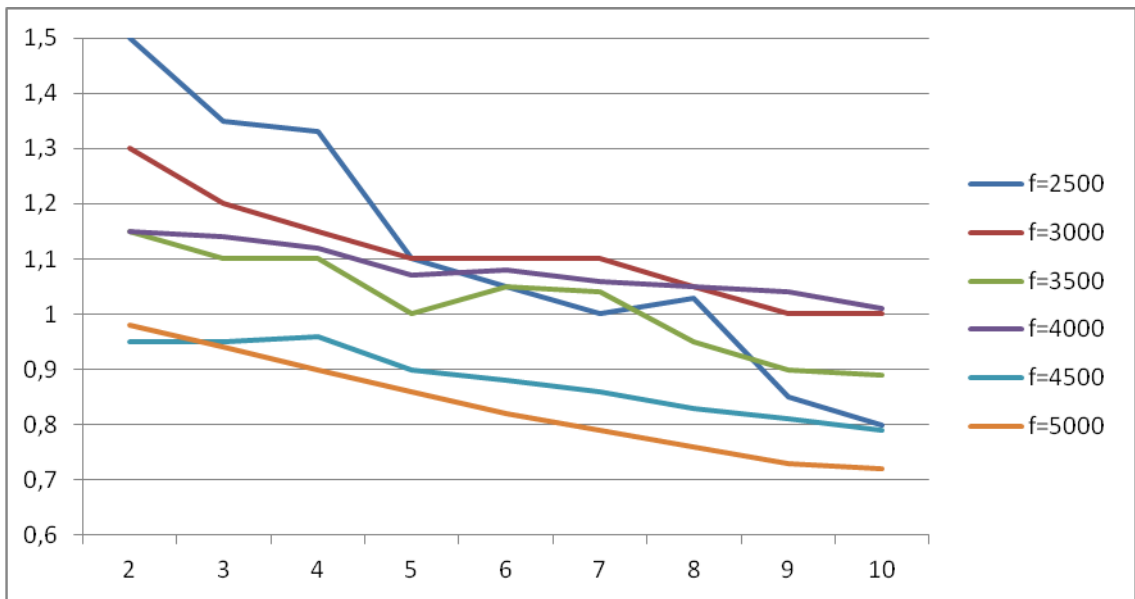


Рисунок 4.29 - Зависимость шероховатости поверхности образцов от времени воздействия частоты звуковых колебаний при обработке в среде И-40

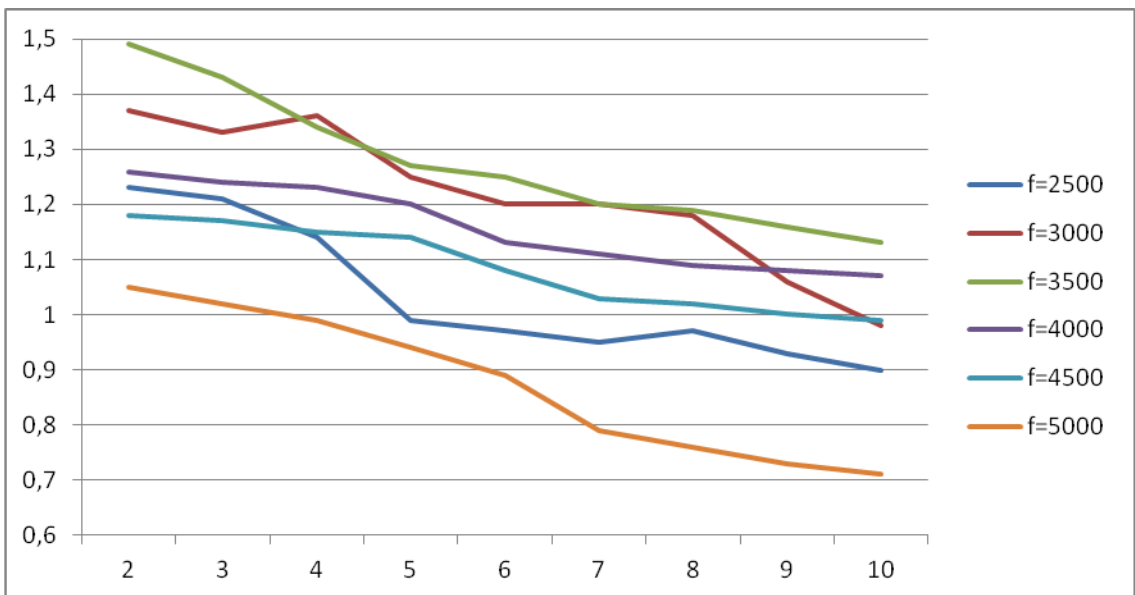


Рисунок 4.30 - Зависимость шероховатости поверхности образцов от времени воздействия частоты звуковых колебаний при объеме упругой среды И-40 + порошок

Анализируя результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что применение метода вибрационной обработки действительно приводит

к повышению твердости стали и снижению шероховатости поверхности деталей.

В целом, все используемые объемы упругой среды дали положительные результаты.

Следовательно, необходимо более углубленно и тщательно продолжать исследование методов виброобработки в упругой среде, чтобы доказать неоспоримые достоинства и необходимость в применении этого метода в производстве.

#### **4.9 Анализ профилограмм и опорной кривой обрабатываемой поверхности**

О происходящих на уровне микронеровностей изменениях свидетельствуют опорные кривые, полученные в результате обработки профилограмм, снятых с поверхности образцов до и после обработки.

Анализируя графики и профилограммы можно сделать вывод, что наиболее эффективно время обработки 8-12 минут. Анализ результатов показал, что после 10 минут вершины заостряются, а впадины сжимаются. Такая динамика изменения данных параметров шероховатости и относительной опорной длины возможна из-за следующего. Вначале происходит упрочнение по острым пикам. Уменьшается высота пика и его опорная площадка, а впадина уменьшается. Потом происходит закругление пиков. Потом происходит разупрочнение и происходит обратная реакция. Так как уменьшаются пики и впадины и соответственно увеличиваются, следовательно, происходит ППД.

#### **4.10. Исследование влияния АООКУС на маслоёмкость и площадь фактического контакта обрабатываемой поверхности**

Маслоёмкость поверхности представляет собой способность поверхности удерживать в микровпадинах жидкость с тем, чтобы при давлении на неё эта жидкость не вытекала за границы лунки. Повышенная маслоёмкость способствует созданию слоя «смазки», обеспечивающей жидкостное трение, и, как следствие, предохраняет поверхность от изнашивания.

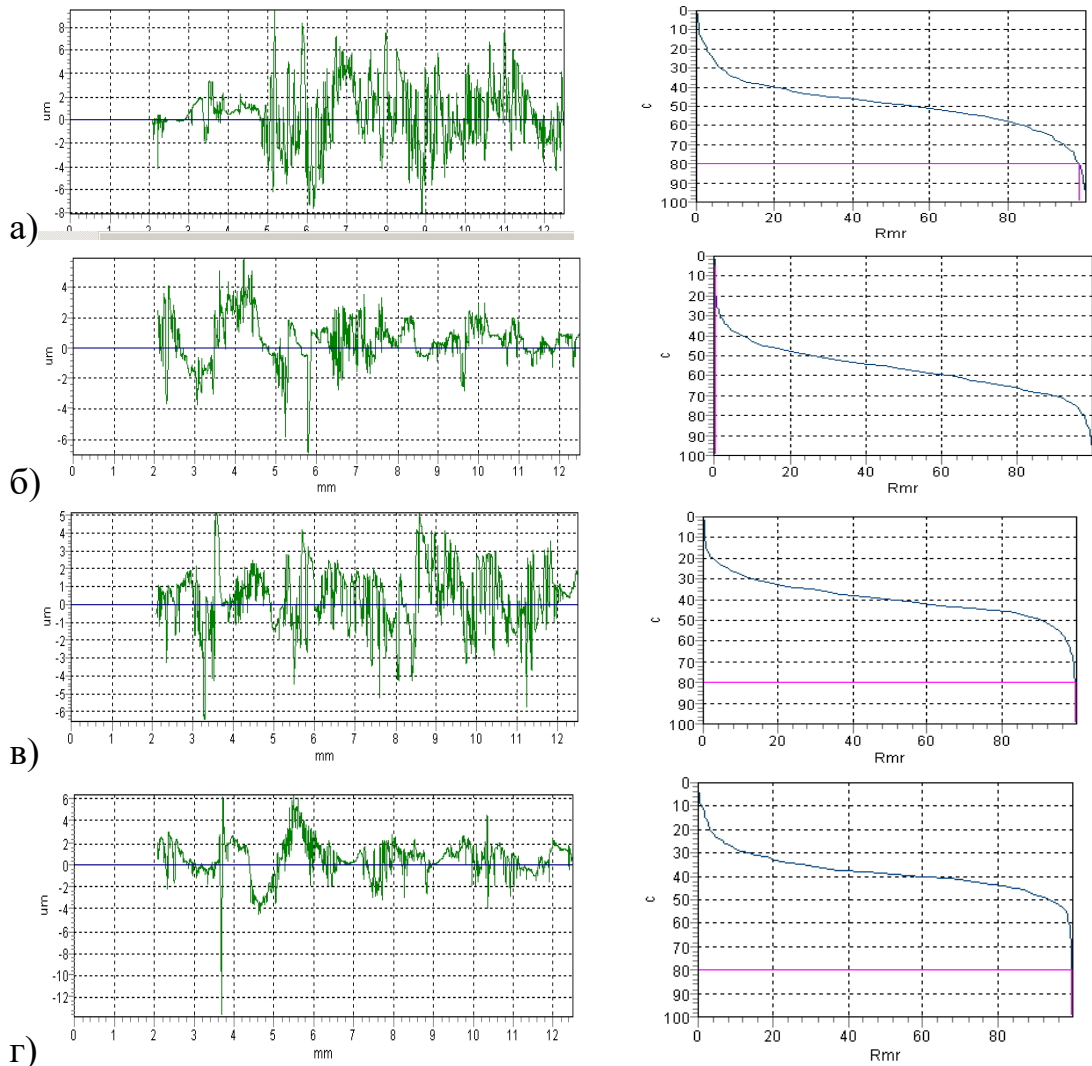


Рисунок 4.31 - Изменение микропрофиля и Кривая Аббота до и после обработки : а-исходная, б-5 минут, в-10 минут, г-15 минут.

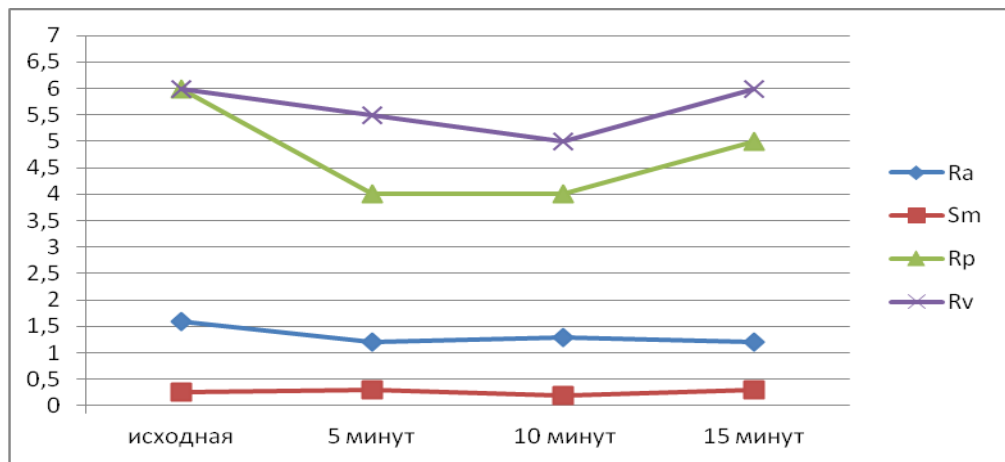


Рисунок 4.32 - Зависимость параметров шероховатости от режимов обработки АООКУС

Согласно таблицы 4.8, удельная маслоёмкость образцов, обработанных АООКУС выше, чем у образцов, обработанных шлифованием. В результате АООКУС изменяется микрорельеф поверхности изделия, создаётся множество не связанных между собой впадин, которые являются маслоёмкими резервуарами.

Поверхность покрыта впадинами, выполняющими роль масляных микрокарманов. Эта поверхность соответствует микрорельефу с элементами вогнутой формы по ГОСТу 24773-81

Изменение параметров исходной шероховатости поверхности по ГОСТ 2789 и международному стандарту ISO 13565-2:1996 (DIN 4776) после АООКУС представлено в таблице 4.8. Параметры шероховатости являются средними значениями при измерении 20 образцов с одинаковой шероховатостью.

Таблица 4.8 – Параметры шероховатости поверхности до и после обработки

Исследуемая поверхность		$R_a$	$R_{max}$	$R_{pk}$	$R_k$	$R_{vk}$	$R_{pk} + R_k$
Сталь 45	до обработки	0,83	4,95	1,38	2,12	0,72	3,50
	после обработки	0,72	4,05	1,18	1,75	0,57	2,93

Анализ параметров шероховатости по ISO 13565-2:1996 показал:

- параметр  $R_k$ , характеризующий основу профиля, которая длительное время находится в работе и является несущей площадью по мере срабатывания наружных слоев, уменьшается в 1,4 раза;

- параметр  $R_{pk}$ , характеризующий высоту выступов, изнашивающихся в период приработки, уменьшается;

- параметр  $R_{vk}$ , характеризующий глубину впадин профиля и, соответственно, смазывающую способность, увеличивается;

- сумма параметров  $R_{pk} + R_k$ , характеризующая изнашиваемость поверхностей уменьшается.



#### 4.11 Регрессионный анализ результатов эксперимента

Для разработки системы регрессионных уравнений, раскрывающих закономерность  $R_a$  обработанной поверхности от  $R_a$  исходной поверхности и времени обработки применяется однофакторный дисперсионный анализ.

На первом этапе, с целью сокращения продолжительности экспериментальных исследований и снижения затрат на их реализацию, для выбора наиболее приемлемой формы уравнения регрессии были построены графики изменения параметров обработки со временем при фиксированном начальном значении. Это позволило определить, что уравнение регрессии первого порядка не может дать удовлетворительное математического описания, и необходимо перейти к планированию второго порядка, чтобы учесть оценки квадратичных эффектов факторов и построить адекватную математическую модель.

На втором этапе в результате обработки экспериментальных данных, с помощью корреляционно-регрессионного анализа были получены уравнения регрессии, которые характеризуют зависимости параметров ПС от времени обработки.

Статистическая обработка экспериментальных данных состояла в вычислении оценок регрессионных коэффициентов за методом наименьших квадратов, проверке их значимости, оценке воспроизводимости экспериментов и установлении адекватности полученного регрессионного уравнения. При этом использовали статистические критерии Кохрена, Стьюдента и Фишера (при доверительной вероятности 95%).

В качестве образца использовалась деталь - цилиндр, изготовленная из алюминиевого сплава токарной обработкой.

Параметры обработки (входные):

- время обработки,  $t$ , мин;
- среда, масло И-40, будем считать постоянной;
- частота и амплитуда колебаний.

Частоту будем считать переменной (устанавливается по максимуму амплитуды), а амплитуду учитывать не будем, т.к. она устанавливается самостоятельно. Числовое значение амплитуды условное, по программе.

Задача, имея экспериментальные данные определить зависимость параметров поверхностного слоя от режимов обработки.

Отообразим графически экспериментальные данные по  $R_a$  в разные промежутки времени и при различных исходных значениях (рисунок 4.33).

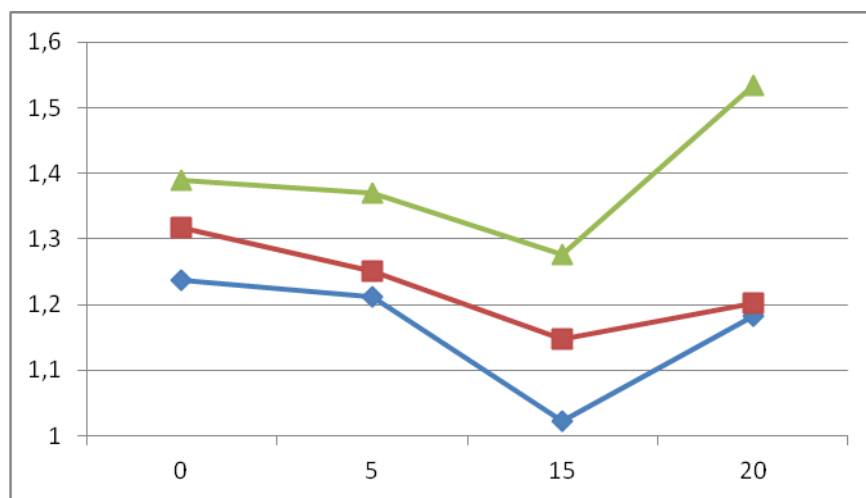


Рисунок 4.33 - Зависимость  $R_a$  от времени обработки

Как следует из схожести форм графиков, параметр  $R_a$  зависит от времени. Однако графики смещены друг от друга вдоль оси ординат, поэтому следует учитывать в качестве входного параметра исходное значение  $R_a$ .

Проверка линейной (по обеим переменным) регрессионной модели

$$R_a = b + a_0 R_a^{\text{исх}} + a_1 t \quad (4.1)$$

на адекватность показывает, что коэффициент детерминации не достаточно велик ( $R^2 = 0,82$ ), и не все коэффициенты значимы. Значит, следует проверить другую модель.

Параболическая (по переменной  $t$ ) регрессионная модель (4.2)

оказалась более адекватной: коэффициент детерминации  $R^2 = 0,92$  и все коэффициенты значимы (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Коэффициенты регрессионной модели

Коэффициент	$a_1$	$a_0$	b
Значение	-0,0019	0,7466	0,2652
Погрешность вычисления	0,0045	0,0776	0,14

$$R_a = b + a_0 R_a^{\text{исх}} + a_1 t + a_2 t^2 \quad (4.2)$$

При подстановке в данную модель значений переменных получим значения, не слишком отличающиеся от реальных табл 3

$$R_a = 0,53 + 0,86 R_a^{\text{исх}} - 0,09 t + 0,004 t^2 \quad (4.3)$$

Уравнение регрессии, которые адекватно описывают зависимости параметров обработки от времени обработки имеют вид:

- для пластины:

$$R_a = 0,776 * R_a^0 + 0,020 * t - 0,010 * R_a^0 * t \quad (4.4)$$

$$S_m = 0,827 * S_m^0 + 0,007 * t - 0,009 * S_m^0 * t - 0,00004 * S_m^0 * t^2 \quad (4.5)$$

$$R_v = 1,439 * R_v^0 + 0,101 * t - 0,086 * R_v^0 * t + 0,002 * R_v^0 * t^2 \quad (4.6)$$

- для цилиндрического образца

$$R_a = 1,255 * R_a^0 - 0,042 * t + 0,004 * t^2 - 0,038 * R_a^0 * t \quad (4.7)$$

$$R_{sm} = 2,420 * R_{sm}^0 + 0,010 * t - 0,292 * R_{sm}^0 * t + 0,010 * R_{sm}^0 * t^2 \quad (4.8)$$

$$R_p = 1,152 * R_p^0 + 0,167 * t - 0,098 * R_p^0 * t + 0,003 * R_p^0 * t^2 \quad (4.9)$$

$$R_v = 1,994 * R_v^0 + 0,085 * t - 0,221 * R_v^0 * t + 0,009 * R_v^0 * t^2 \quad (4.10)$$

$$t_{p\ 20\%}^0 = 1,067 * t_{p\ 20\%}^0 + 0,161 * t - 0,055 * t_{p\ 20\%}^0 * t \quad (4.11)$$

$$t_{p\ 50\%} = 2,145 * t_{p\ 50\%}^0 + 0,976 * t - 0,182 * t_{p\ 50\%}^0 * t + 0,005 * t_{p\ 50\%}^0 * t^2 \quad (4.12)$$

Таким образом, в результате теоретических исследований 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. Графическая интерпретация зависимостей в виде поверхностей отклика представлена в приложении Пб.

Предложенная установка обеспечивает уменьшение времени на финишную обработку и энергозатрат за счет обработки на резонансных частотах, и объединяет два процесса: вибростабилизацию и повышение качества поверхности. В основе технологии лежит способность дислокаций металла, который подвергается виброобработке с наложением акустических колебаний, поглощать энергию звуковой и ультразвуковой частот и превращать в энергию собственных перемещений, содействующей стабилизации остаточного напряжения.

Износостойкость обработанных образцов повышается. Зависимости относительного износа для образцов изготовленных из стали 45 представлены на рисунке 4.34-4.35.

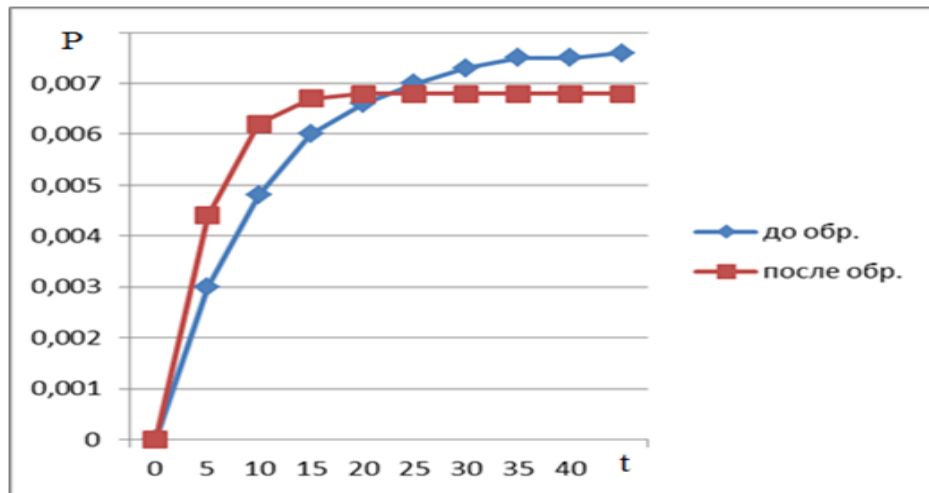


Рисунок 4.34 - Зависимость относительного износа по размеру (P) во времени (t)

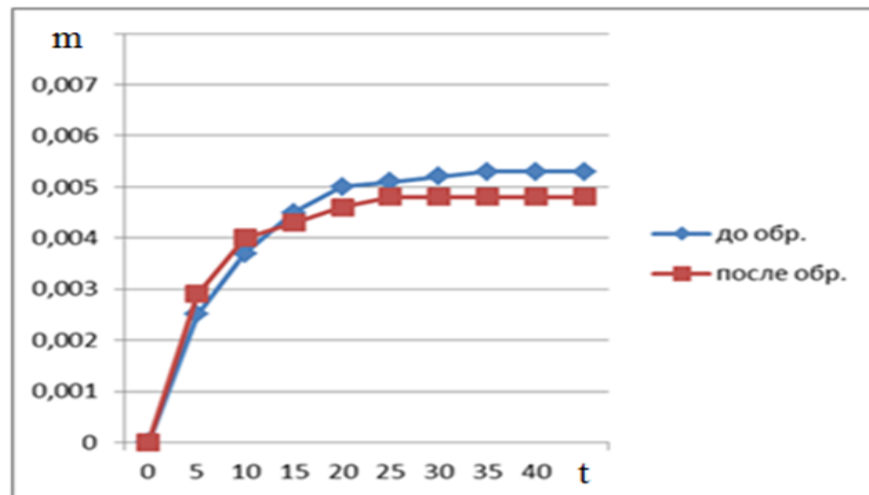


Рисунок 4.35 - Зависимость относительного износа по массе (m) во времени (t)

Время приработки образцов составляет 20 минут после обработки и 30 минут до обработки. Относительный износ в 1,15 раза меньше после проведенной обработки.

### Выводы по четвертому разделу

1. Выполнено планирование полного двухфакторного эксперимента. Определены уровни факторов и количество необходимых опытов равное девяти.

2. Резонансная виброобработка в квазиупругой среде позволяет получить топографию обрабатываемой поверхности близкую к рациональной
3. Определены закономерности формирования параметров ПС в зависимости от режимов обработки.
4. Амплитуда ВК зависит от формы концентратора, формы и материала образца.
5. При АООКУС наблюдается образование рабочих поверхностей с субмикрорельефом, залечивающим дефектные зоны.
6. Самый большой эффект наблюдается при обработке в резонансной частоте и на протяжении 10 минут.
7. Увеличение объема рабочей среды положительно влияет на твердость обрабатываемой поверхности, в то время как на показатели шероховатости такое влияние имеет уменьшение объема.
8. В результате АООКУС изменяется микрорельеф поверхности изделия, создаётся множество несвязанных между собой впадин, которые являются масляёмкими резервуарами.
9. В результате теоретических исследований 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.

## РАЗДЕЛ 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 5.1 Перспективы применения АООКУС

При выполнении диссертационной работы изучена технология акустической ОУО в квазиупругих средах. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что применение АООКУС имеет ряд преимуществ и позволяет рекомендовать её для использования в практических целях.

Экспериментальные данные, полученные при выполнении работы, используются в учебном процессе в Донецкой академии автомобильного транспорта.

Полученные в предыдущем разделе результаты исследований достаточно убедительно продемонстрировали широкие возможности АООКУС при формировании качества поверхности деталей. Поэтому дальнейшее развитие технологического приема "виброобработка в квазиупругих средах" может осуществляться в направлении расширения его промышленного использования для различных типов деталей в условиях специализированных механических цехов. Как уже было показано ранее, виброобработка обеспечивает достижение определенных положительных эффектов по целому ряду показателей. Однако, для каждого из таких качественных критериев оптимальные режимы виброобработки могут существенно отличаться, что соответственно предопределяет необходимость проведения предварительного системного анализа, включающего в себя определение взаимосвязи между принципами выбора режимов обработки на базе рассмотренных механизмов воздействия вибрации. Общая схема такого анализа, сформулированная на базе выполненных в работе исследований и разработанных моделей влияния режимов АООКУС на качество поверхности, приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Области возможного применения АООКУС

Область применения	Объект обработки или область применения	Результат вибровоздействия
ОУО	Малогабаритные детали машин	Обеспечение качества ПС
Вибро-стабилизирующая обработка	Сварные детали	Снятие остаточных напряжений
Очистная обработка	Малогабаритные детали из различных материалов.	Очистка поверхности
Финишная обработка поверхностей	Суперфиниширование , притирка доводки	Создание рационального микропрофиля поверхности
Ультразвуковая очистка поверхностей	Для очистки деталей точных приборов, часов и ювелирных изделий, интегральных схем и деталей радиоаппаратуры, хирургических инструментов, металлокерамических фильтров, металлургического проката и др.	Получить высокую степень чистоты поверхности, а также исключить использование огнеопасных, токсичных и дорогостоящих растворителей.
Обработка	Для паянного инструмента	Снятие остаточных напряжений, очистка
Подготовка поверхности металла к нанесению лакокрасочного покрытия	Защитно-декоративные покрытия Лакокрасочные покрытия	Обеспечение заданного профиля поверхности и степень очистки. Очистка и обезжиривание.
Гальванические покрытия, напыление	Малогабаритные детали	Повышение диффузии

## 5.2. Экономический эффект от применения АООКУС

Методы ОУО позволяют достичь ресурсосбережения при изготовлении деталей. Экономический эффект от применения АООКУС обусловлен следующим:



1. Повышение долговечности деталей обработанных АООКУС вследствие увеличения износостойкости которое ведет к снижению энергозатрат и продлению срока службы деталей.
2. Продление межремонтных сроков работы машин за счет повышения эксплуатационных свойств деталей пар трения.
3. Уменьшение количества используемых деталей на протяжении всего срока службы машины приводит к уменьшению использования материалов на изготовление запасных частей.
4. Себестоимость изготовления включает несколько составляющих. Некоторые из них, такие как стоимость израсходованной энергии заработная плата могут быть значительно снижены за счет применения АООКУС.

### **5.3. Внедрение АООКУС**

На предприятии «Рембыттехника» на балансе 70 автомобилей MAN, ремонт которых осуществляется на предприятии. Одна из деталей, наиболее подверженная износу – «Палец рессоры». Палец рессоры, который установлен на переднем мосту, имеет: длину - 136 мм; внешний диаметр - 26 мм; вес - 0,536 кг. Износ рессорных пальцев и втулок вызывает увеличение люфта рулевого управления и может привести к поломки коренного письма рессоры. Был сделан статистический анализ износа поверхности детали. Было установлено что ресурс детали до предельного износа – 6 месяцев.

Деталь «палец рессоры» был установлен в ушко рессоры. Испытания проводились в эксплуатационных условиях. В результате эксплуатационных испытаний установлено, что эксплуатационная долговечность деталей повысилась до 150000 км пробега автомобиля по сравнению с 120000 до обработки, т.е. увеличилась на 25%.

Акт использования результатов в производственном процессе приведен в Приложении П 7.

#### **5.4. Применение результатов проведенных исследований в учебном процессе**

Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, используются в лекционных курсах и при выполнении лабораторных работ при реализации учебного процесса по дисциплинам "Материаловедение», «Технология конструкционных материалов», «Основы технологии ремонта» в Донецкой академии автомобильного транспорта.

Акт использования результатов в учебном процессе приведен в Приложении П 8.

Полученные в работе результаты используются студентами различных курсов при выполнении учебной практики, а также при подготовке выпускных бакалаврских и магистерских квалифицированных работ.

Полученные автором диссертации данные могут быть полезны при выполнении подобных исследований по разработке инновационных технологий ОУО деталей машин.

#### **Выводы по пятому разделу**

1. Технический эффект заключается в разработке метода улучшения эксплуатационных свойств деталей пар трения машин и разработке технической установки на уровне изобретения.

2. Экономический эффект достигается за счет снижения себестоимости ОУО, снижения энергоемкости изготовления деталей и повышение долговечности ответственных деталей.

## 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. 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.

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

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Алиев, А.А. Качество поверхности и свойства деталей машин / А.А. Алиев, В.П. Булгаков, Б.С. Приходько // Вестник Астраханского ГТУ. – 2004. – №1. – С. 8-13.
2. Андреев, Ю.С. Исследование микрорельефа поверхностей в процессе их трения-скольжения / Ю.С. Андреев, В.В. Медунецкий // Известия вузов. «Приборостроение» – 2012. – №5. – С. 159-164.
3. Аникеев, А. Н. Моделирование способа повышения износостойкости коронок экскаваторов путем дисперсного упрочнения карбидом титана / А.Н. Аникеев, И.В. Чуманов, И.А. Сементин // Сталь. – 2015. – №2. – С.72-74.
4. Архангельский, И.М. Передовые методы применения ультразвука в технологических процессах обработки металлов в машиностроении / И.М. Архангельский, Е.М. Кремлев, К.М. Погодина-Алексеева. - М.: ЦП НТО МАШПРОМ, 1970. – 70 с.
5. Аршанский, М.М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М.М. Аршанский, В.П. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1988. - 136 с.
6. Асташев, В.К. Инновационные авторезонансные технологии / В.К. Асташев, В.Л. Крупенин // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 7. – С.84-85.
7. Ахтулова, Л. Н. Основы системы автоматизации проектирования процесса приработки двигателя / А. Л. Ахтулов, А. С. Байда. – Омск: СибАДИ, 2008. – 143 с.
8. Бабичев, А.П. Исследование технологических основ процессов обработки деталей в среде колеблющихся тел с использованием низкочастотных вибраций: дис.....докт. техн. наук: 05.02.08 / Бабичев Анатолий Прокопьевич; Тул. политехн. ин-т. – Ростов н/Д, 1975. – 462 с.
9. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии. 2-е изд., перераб. и доп. / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 693 с.

10. Бабичев, А.П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи и др. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 285 с.
11. Байкалов, А.К. Введение в теорию шлифования материалов /А.К. Байкалов. - Киев: Наук. думка, 1978. – 270 с.
12. Бардин, И.В. Электрические режимы микродугового оксидирования алюминиевого и магнитного сплавов в щелочных электролитах: дис. ... канд. хим. наук: 05.17.03 / Бардин Илья Вячеславович; МИСиС. – М., 2009. – 179 с.
13. Безъязычный, В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства машин / В.Ф. Безъязычный // Вестник РГАТА. 2002. – №2. - С. 64-78.
14. Берсудский, А.Л. Технологическое обеспечение долговечности деталей машин на основе упрочняющей обработки с одновременным нанесением антифрикционным покрытий: дис..... докт. техн. наук: Берсудский Анатолий Леонидович: 05.02.08/ Берсудский Анатолий Леонидович; Московский государственный институт путей сообщения. – Москва, 2007. – 335 с.
15. Технология производства авиационных двигателей ч. 1. Основы технологии / В. А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2005. – 518 с.
16. Бранспиз, Е.В. К вопросу создания математической модели виброабразивной обработки деталей на вибрирующем держателе в неподвижном контейнере / Е.В. Бранспиз, М.А. Калмыков, Е.В. Нечай // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №3/7 (39). – С. 27-32.
17. Бутенко, В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем / В.И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.
18. Васильев, А.С. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко С.А. [и др.] – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
19. Войтов, В. А. Универсальная машина трения / В. А. Войтов, В. А. Баздеркин // Трение и износ. –1992. – Т. 13. – № 3. – С. 501-506.

20. Вовк, Л.П. Теоретические и экспериментальные методы определения механических характеристик неоднородных деталей машиностроения / Л.П. Вовк, А.А. Писанец – Донецк: „Вебер”(Донецкое отделение), 2007. – 213 с.
21. Горленко, А. О. Метод и автоматизированная установка для испытаний износостойкости цилиндрических поверхностей трения после различных технологических методов обработки / А. О. Горленко, М. И. Прудников, В. П. Матлахов // Гидродинамическая теория смазки - 120 лет: Труды Межд. научного симпозиума. В 2-х томах. Т. 2. — М.: Машиностроение-1, Орел: ОрелГТУ, 2006. – С. 242-247.
22. Гурей В. І. Моделювання динамічних процесів фрикційного зміцнення деталей машин / В. І. Гурей // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2012. – № 3 (59). – С. 110-115.
23. Гуров, Р.В. Взаимосвязь режимов обработки и геометрических параметров инструмента с параметрами качества поверхностного слоя при отделочных и отделочно-упрочняющих режимах ОУО ППД / Р.В.Гуров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №8. – С. 88-94.
24. Гуров, Р.В. Проектирование технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием деталей машин с учетом их функционального назначения: дис. ...д-р. техн. наук: 05.02.08 / Гуров Роман Владимирович; Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск, 2012. – 302 с.
25. Димов, Ю.В. Финишная обработка деталей свободным абразивом // Повышение эффективности процессов механообработки: Сб. науч. трудов. — Иркутск: НИИ, 1990. – С. 3-6.
26. Денисов, П.Д. Регулируемые вибровозбудители / П.Д. Денисов, П.С. Берник // Вибрации в технике и технологиях. – 1996. – №1(3) – С.41-47.
27. К вопросу изменения микротвердости материала при вибрационной обработке. / Дудников А.А., Беловод А.И., Канивец А.В., Дудник В.В / Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – №1(61). – С. 96-100.
28. Дунин-Барковский, И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, Карташова А.Н. – М.

- Машиностроение, 1978. – 232 с.
29. Екимова, В. Д. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин // Молодая наука XXI века: материалы междунар. студ. науч. конф.-Краматорск: Изд-во ДГМ А, 2013. – С.60-64.
  30. Елизаветин, М.А. Технологические способы повышения долговечности машин / М.А. Елизаветин, Э.А. Сатель. – М.: Машиностроение, 1979.- 438 с.
  31. Зиновьев, Е. В. Физико-химическая механика трения и оценка асбофрикционных материалов / Е. В. Зиновьев, А. В. Чичинадзе – М: Наука, 1978. – 206 с.
  32. Иванов, В.В. Формирования оксидной пленки в условиях виброобработки с использованием полимерных рабочих сред. / В.В. Иванов // Вибрации в технике та технологиях. – 2010. – №1(57). – С. 94-97.
  33. Инженерия поверхностей деталей / Колл.авт.; Под ред. А.Г. Сулова. – М.: «Машиностроение», 2008. – 320 с.
  34. Иосифов, В.В. Технологическое управление качеством машиностроительной продукции: Монография/ В.В. Иосифов, Л.Ф. Мелехин. - ФГБОУ ВПО «КубГТУ». – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2014. – 226 с.
  35. Карташов, И.Н. Обработка деталей свободным абразивом в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов. – Киев: Вища школа, 1975. – 188 с.
  36. Качество машин: справочник: в 2 т. / А.Г. Сулов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич [и др.]. – М: Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 256 с.
  37. К вопросу исследования влияния поверхностно-активных веществ на резонансные колебания нагруженных пластин / С. В. Ковалевский, Ю. П. Половая, В. И. Тулупов, Д. П. Шистко // Нейросетевые технологии и их применение: Материалы межд. научно-техн. конф. "НСТиП 2008". – Краматорск. – 2008. – С. 79-86.
  38. Качество машин: Справочник в 2-х т. Т.1 / А.Г. Сулов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. - М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
  39. Ковалевский, С. В. Исследование возможностей управления твердостью рабочих поверхностей изделий с помощью резонансных колебаний и поверхностно-активных веществ / С. В. Ковалевский, Л. В. Полийчук // Надійність



- інструменту та оптимізація технологічних систем. – 2010. – Вип. 26. – С. 155-162.
40. Ковалевський, С. В. Особливості енергозберігаючих технологій зміцнення робочих поверхонь деталей автомобілів / С. В. Ковалевський, С. А. Матвієнко // Логістика промислових регіонів: матеріали третьої міжнародної науково-практичної конференції, Донецьк - Святогірськ, 6 - 9 квітня 2011 р. – Донецьк: Ландон XXI, 2011. – С. 373-376.
  41. 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 // Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2012. – Вип. 122. – С. 122-127.
  42. Ковалевський, С.В. Аналіз стану проблеми реновації деталей автомобілів технологічними методами/ С.В. Ковалевський, А.В. Лукічов, С.А. Матвієнко // Вісник ЖДТУ. – №3 (62). – 2012. – С. 74-78.
  43. Ковалевський, С.В., Матвієнко С.А., Лукічов О.В. Спосіб зміцнювальної вібраційної обробки в пружному середовищі та установка для його здійснення / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, О.В. Лукічов // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій. 3-я Міжнародна науково-технічна конференція: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2012. – С. 72-73.
  44. Ковалевський, С.В. Моделювання коливальних процесів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, О.Ю. Деньщиків, О.В. Лукічов // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012.- Вип. 2(32), т.1. – С. 93-99.
  45. Ковалевський, С.В. Аналіз причин недостатнього строка 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: зб.наук.пр. Вип.135/2012. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь – 2012. – С. 56-61.
46. Комбалов, В. С. Оценка триботехнических свойств котирующих поверхностей / В. С. Комбалов. – М.: Наука, 1983. – 213 с.
  47. Косырев, С.П. Кавитационная эрозия элементов регуляторов скорости форсированных дизелей / С.П. Косырев, И.О. Кудашёва // Вестник СГТУ. – 2009. –Т.10, №1.-С.54-58.
  48. Костецкая, Н. Б. Структурные и энергетические критерии оценки износостойкости материалов и деталей машин [Текст]: автореферат дисс. ... канд техн. наук/ Н. Б. Костецкая. – Киев, 1985. – 16 с.
  49. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение: монография / Ю.Р. Копылов. Воронежский институт МВД России. – Воронеж, 1999. – 386 с.
  50. Костецкий, Б.И. Качество поверхности и трение в машинах / Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колисниченко. – Киев: ТЕХНІКА, 1969. – 214 с.
  51. Кравцов, А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей при изготовлении / А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов. Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) – Ирбит: ОНИКС, 2011. – 261 с.
  52. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М. Н. Добычин, В.С. Комбалов – М: Машиностроение, 1977.-526 с.
  53. Моделирование процесса виброотделки детали средами органического происхождения / Е.Ю. Крупеня, В.А. Лебедев// Весник ДГТУ. Е.Ю. Крупеня, В.А. Лебедев. 2010. – Т.10. – №1(44). – С. 44 51.
  54. Лебедев, В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования: науч. издание / В.А. Лебедев. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 183 с.
  55. Лебедев, В.А. Кинематика формирования упрочненного, поверхностного слоя в процессе ППД / В.А. Лебедев / Вопросы вибрационной технологии: межвуз: сб. науч. ст. Ростов н/Д: Издательский центр ДРТУ, 2006. –С. 92-95.

56. Лебедев, В.А. Классификация и энергетическая сущность формирования вибрационных механохимических покрытий. / В.А. Лебедев, В.В. Иванов // Прогресивні технології і системи машинобудування. – Вип 1(45)-2(46). – 2013. – С. 160-167.
57. Лубенська, Л.М. Інтенсифікація процесу обробки поверхні сталей при використанні низкочастотних коливань робочого середовища / Л.М. Лубенська, П.В. Колодяжний // Вібрації в техніці та технологіях. – №3(59). – 2010. – С. 105-109.
58. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – Москва: Высшая школа, 1967. – 600 с.
59. Маталин, А.А. Технология машиностроения. Л.: Машиностроение, 1985. – 512 с.
60. Матвиенко, С.А. Повышение износостойкости деталей грузовых автомобилей технологическими методами: анализ и перспективы развития / С.А. Матвиенко, Е.И. Донченко, А.А. Писанец // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2012. – №4. - С. 78-86.
61. Матвієнко, С.А. Поліпшення трибологічних характеристик робочих поверхонь пар тертя вузлів автомобіля / С.А. Матвієнко, О.В. Лукічов, Сакно О.П. // Логістика промислових регіонів: збірник наукових праць за матеріалами п'ятої Міжнародної науково-практичної конференції, 3-4 квітня 2013 року. Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Донецька академія автомобільного транспорту, Приазовський державний технічний університет [та інш.], – Донецьк: ЛАНДОН-XXI, 2013 – С. 204-207.
62. Медведев Д.М. Исследование равновесного качества поверхности трения / Д.М. Медведев // Весник Брянского государственного технического университета. – 2008. - №4(20). – С. 11-16.
63. Мельникова, Е.П. Обеспечение заданного качества поверхности при финишных методах обработки/ Е.П. Мельникова // Вестник ДГТУ. – 2008.- Т.2, №4(14). – С.370-376.

64. Милосердов, С.К. Повышение интенсивности процесса шпиндельной вибрационной обработки за счет уплотнения рабочей среды / С.К. Милосердов // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. статей. - Ростов н/Д: ДГТУ, 2001. – С. 36-38.
65. Методы испытаний на трение и износ / Л.И. Куксёнова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова. – М.: «Интернет инжиниринг», 2001. – 152 с.
66. Минаков, А.П. Сравнительная оценка параметров качества рабочих поверхностей гильз цилиндров, обработанных различными способами / А.П. Минаков, Е.В. Ильюшина // Прогрессивные технологии, машины и оборудование в машиностроении: сб. докладов. – Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2008. – С. 86-92.
67. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
68. Михайлов, А.Н. Синтез технологического обеспечения производства зубчатых колёс на базе функционально-ориентированного подхода / А.Н. Михайлов, А.М. Лахин, В.А. Соосар // Технические науки. – 2013. – Вып. 8. – С. 28-35.
69. Михин, Н.М. Внешнее трение твердых тел / Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1977. – 220 с.
70. Мицьк, А.В. Новая разновидность способа вибрационной обработки с использованием струйного движения потоков жидкости / А.В. Мицьк, В.А. Федорович // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2012. – Вип. 129. – С. 64-71.
71. Моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин [Текст] / А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов; науч. ред. О. И. Драчев. – 2-е изд., испр., перераб. и доп. – Тольятти: [б. и.], 2012. – 293 с.
72. Моделювання коливальних процесів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі / С. В. Ковалевский, С. А. Матвієнко, О. Ю.

- Деньщиков, О. В. Лукічов // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – 2012. – Вип. 2(32), Т.1. – С. 93-99.
73. Нанотехнологии. Упрочнение поверхностных слоёв диффузионного молекулярного / Р.М. Богомолов, С.М. Крылов, Д.Г. Громаковский, И.Д. Ибатуллин // Трение, износ, смазка 2007. – Том 9. № 1(30). – С. 36-81.
74. Нелидин, В.В. Повышение интенсивности процесса шпиндельной виброотделки деталей на основе дополнительного уплотнения рабочей среды: дис. ...канд.техн. наук: 05.02.07 / Владимир Владимирович; Донской гос. н-т. – Волгоград, 2010. – 155 л.
75. Нечай, Е.В. Анализ финишных методов обработки деталей в среде свободных абразивов / Е.В. Нечай, Н.И. Пичугин // Вібрації в техніці та технологіях– 2010. – №2(58). – С. 152-166.
76. Николаенко, А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке / Вібрації в техніці та технологіях. – 2010. – №2(58). – С. 167-181.
77. Новик А.А. Применение технологического ультразвука для производства ультрадисперсных материалов / В.Д. Гончаров, А.А. Новик // Известия СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – №5. – С. 98-103.
78. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / [И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др.]под ред. И.Н. Карташова. – К.: Вища школа, 1975. – 188 с.
79. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. – М.: Машиностроение, 1987 – 328 с.
80. Обловацкая, Н. С. Повышение качества поверхностного слоя изделий из низкоуглеродистых легированных сталей методом ультразвуковой финишной обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Наталья Сергеевна Обловацкая; – Северодвинск, 2007 – 136 л.
81. Осипенкова, Г. А. Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Галина Алексеевна Осипенкова; – Н.Тагил – 2009. 143 с
82. Панавко, Я.Г. Введение в теорию механического удара / Я.Г. Панавко – М.: Наука, 1977. – 223 с.

83. Папшев, Д.Д. Отделочно упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 151 с.
84. Перспективы создания многоуровневого поверхностного слоя деформационным упрочнением / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Н. Афонин. и др. – Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технология. – 2013. – №4. – С.15-19.
85. Повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств изделий технологическими методами / В. М. Сорокин, Н. М. Тудакова, Н. М. Михеев. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2012. – 219 с.
86. Поляк, М. С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2-х т. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1995. – 688 с.
87. Проников, А.С. Надежность машин / А.С. Проников. - М. Машиностроение, 1978. – 592 с.
88. Протасов, Б. В. Явление оптимизации поверхностей трения [Текст] / Б. В. Протасов // Надежность приборов точной механики. Научные труды. Саратов. Вып. 55. Саратовск. политехи, ин-т, 1972. – С. 24.
89. Мицык, А.В. Процесс отделочно-зачистной вибробработки и параметры, влияющие на его производительность / А.В.Мицык, В.А.Федорович // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн. техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – Вып. 83. – С. 184-194.
90. Пучков, В. Н. Несущая способность тяжело нагруженного контакта с твердой смазкой при скольжении / В. Н. Пучков, Ю. Н. Дроздов // Вестник машиностроения. – 1973. – №3. – С. 16-18.
91. Разработка новейших способов комплексного создания износостойких слоев с метастабильной структурой, самоупрочняющихся при изнашивании / А.П. Чейлях, Я.А. Чейлях, Н.Е. Караваева, М.А. Рябикина //Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 74. – С. 72-76.
92. Решетов, Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин. – М.: Высшая школа, 1974. – 205 с.

93. Повышение качества поверхностного слоя изделий методом ультразвуковой финишной обработки / Рогов В. А., Малыгин В. И., Коломеец Н. П., Обловацкая Н. С. // Технология машиностроения. – 2007. – №10. – С.17-20.
94. Розналевич, Н.Н. Улучшение трибологических характеристик пар трения узлов автомобиля технологическими методами / С.А. Матвиенко, А.В. Лукичев, Н.Н. Розналевич // IX Международный форум молодежи «Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке»: сборник материалов форума. – Харьков, ХНТУСХ, 2013. – С. 98.
95. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Рыжов Э.В. – Киев : Наукова думка, 1984. – 272 с.
96. Скобелев, С. Б. Повышение износостойкости деталей пар трения путем выбора рациональных технологических параметров ультразвуковой упрочняющей обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Станислав Борисович Скобелев; Омск, 2010. – 164 л.
97. Скобло, Т.С. Влияние алмазного выглаживания на шероховатость поверхности деталей восстановленных наплавкой и подвергнутых упрочняющему точению/ Т.С. Скобло, Р.В. Ридный // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві» – 2013. – №133. – С. 111-117.
98. Сорокин, В.М. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин / В.М. Сорокин, А.С. Курников // курс лекций по дисциплине «Основы триботехники и технология упрочнения деталей» и задания для выполнения контрольной работы – Н. Новгород: Издательство ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. – 160 с.
99. Смоленцев, Е.В. Классификация комбинированных методов обработки / Е.В.Смоленцев // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т.10, №1(44). – С. 76-79.
100. Стародубцев, И.Н. Исследование процесса механообработки с применением резонансных частот и ПАВ / И.Н. Стародубцев // Молодая наука 21 века: сб. науч. тр. – Краматорск, 2011. – С.84-90.

101. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
102. Суслов, А. Г. Разработка новых конкурентоспособных технологий [Текст] / А. Г Суслов // Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений: Материалы Международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов им. П. А. Соловьева и В. Н. Кондратьева. - Ч. 1. - Рыбинск: РГАТА, 2006. – С. 169-175.
103. Суслов, А.Г. Термофлуктуационная модель изнашивания поверхностей трения твердых тел при граничной смазке / А.Г. Суслов, С.П. Шец, М.И. Прудников // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – №10. – С. 42-49.
104. Суслов, А.Г. Проектирование операций отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием / А.Г. Суслов, Р.В. Гуров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №3. – С.
105. Сулягин А. Н. Влияние параметров качества поверхностного слоя деталей узлов трения на величину их износостойкости // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2007. №6. – С. 46 - 48.
106. Тамаркин, М.А. Технологические процессы основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ...д-ра техн. наук: 05.02.08 / Михаил АркадьевичТамаркин; Ростов н/Д, 1995. – 310 с.
107. Таранов А.С. Повышение эффективности упрочнения поверхности валов при ремонте сельскохозяйственной техники поверхностным пластическим деформированием в переменном магнитном поле: дис. ...д-ра техн. наук: 05.20.03 /Алексей Степанович Таранов; Челябинск, 2010. – 451 с.
108. Тарасов, Д.Е. Повышение контактной выносливости комбинированным упрочнением статико-импульсной обработкой и цементацией: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 /Дмитрий Евгеньевич Тарасов; Орел, 2013. – 170 с.
109. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др. - М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
110. Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования / Под. Ред. В.И. Беляева. – Минск: Наука и техника, 1987. – 229 с.



111. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В.Б. Альгин (и др); под общ. Ред. П.А. Витязя. – Минск: Беларус. Навука, 2010. – 109 с.
112. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки [Текст] / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалева. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2012. – 191 с.
113. Технология формообразования и обеспечения качества поверхностного слоя изделия [Текст]: учеб. пособие для студентов / И. Н. Шепелева [и др.]; Сиб. гос. технол. ун-т . – Красноярск: СибГТУ, 2014. – 81 с.
114. Улашкин, А.П. Выбор отделочно-упрочняющих методов обработки (для повышения износостойкости деталей машин) / А.П. Улашкин – Хабаровск. Изд-во Хабар. Гос. техн. ун-та, 1998. – 103 с.
115. Улашкин, А. П. Курсовое проектирование по восстановлению деталей [Текст] : учеб. пособие для техн. спец. вузов / А.П. Улашкин, Н.С. Тузов ; Хабаровский гос. техн. ун-т. - Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2000. - 139 с.
116. Устинов В.П. Изменение напряженного состояния поверхностного слоя в процессе вибрационной обработки // Материалы научно-технического семинара «Вибрационное шлифование, отделка, упрочнение»: Ростов-на-Дону. – 1969. – С. 80-87.
117. Фатюхин Д. С. Ультразвуковые технологии повышения эксплуатационных свойств изделий транспортного машиностроения: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.08 / Фатюхин Дмитрий Сергеевич; [Место защиты: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет "МАДИ"].- Москва, 2014.- 346 с
118. Оценка диапазонов применимости существующих зависимостей для расчета силы, обеспечивающей отделочную, отделочно-упрочняющую и упрочняющую обработку ППД / О Н. Федонин, С. В. Степошина, А. Н. Прокофьев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 4(40) – С.101-105.
119. Цуканов Иван Юрьевич. Технологическое обеспечение и повышение изно-

- состойкости винтовых поверхностей ходовых гаек трения скольжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Иван Юрьевич Цуканов; Москва, 2013. – 190 с.
120. Чистяков, А.В. Влияние физико-механического и структурного состояния поверхностного слоя деталей на их износостойкость / Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск, 1987. – 16 с.
121. Чудина, О.В. Влияние ультразвуковой кавитации на состояние поверхности конструкционных сталей / О.В. Чудина, В.А. Александров, Д.С. Фатюхин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №2. – С.3-6
122. Шец, С.П. Выбор методов обеспечения износостойкости подшипниковых узлов трения // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – №2.(26), – С. 36-41.
123. Швейв Андрей Иванович. Повышение долговечности разжимных кулаков тормозной системы автомобиля на основе разработанного метода реновации: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Андрей Иванович Швейв; Ижевск, 2008. – 169 с.
124. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.
125. Щедров, В. С. Анализ экспериментальных закономерностей приработки на основе общих уравнений теории изнашивания [Текст] / В. С. Щедров // Трение и износ в машинах, IV. – М. – Л.: АН СССР, 1950. -С. 3-12.
126. Інженерія поверхні: підручник / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж – К.: Наукова думка, 2007. – 559 с.
127. Ясуник, С.Н. Вибрационная обработка деталей и её возможности на операциях упрочнения / С.Н. Ясуник // Энергосберегающие технологии и оборудование –.2007. – 5/4(29). С.
128. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 221 с.
129. Ящерицын П.И. , Скорынин Ю.В. Работоспособность узлов трения машин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 288 с.

130. Ковалевський, С.В. Спосіб вібраційної оздоблювальної обробки деталей у квазіпружному середовищі / С.В. Ковалевський, С.А. Матвієнко, К.В. Тулупова // Патент України на корисну модель № 98504, В23Р 9/00. Дата подання заявки 05.12.2014, БИ №8 від 27.04.2015. – 3 с.
131. BorlsenIco E.B., Erofeer V.N. Influence or of ultrasonl treatment ca strength ana plastisity.- Symposium of physic of optical crystals. Abstracts, Budapest, 1989, p.66.
132. Bull A., On the importance of work hardening in the design of wear - resistant materials// Wear. - 1983. Vol. 91, № 2, p/ 201...207.
133. Data sheets on the elevated - temperature properties of 18 Cr — 10 Ni-Ti stainless steel // NRIM. Tokyo, 1987. №5B - 32p.
134. David D., Caplan R. Methods usuelles de caracterisation des surfaces. Paris: EY-ROLLES, 1992.- 374 p.
135. Devis D.C. An Approach to Predicting Long - Term Toughness, Strength, and Ductility of a Cr-Mo-V Steel Alloy Using Shrt - Term // J of Testing and Evaluation, JTEVA- 1990. -vol.18 №4 -p286... 291.
136. FAG Kugelfischer Georg Schafer KGaAPubl.No. FL 40134EA.FAG Aerospace Bearings. A Practical Method Calculating the Attainable Life in Aerospace Bearing Applications.
137. Gillespie, LaRoux, Deburring and Edge Finishing Handbook, SME, Dearborn, MI, 1999.
138. Grobuschek, F. Optimited Engine Bearing Design by Evaluating Performance // F. Grobuschek, U. Ederer // Diesel and Gas Turbine Progress Worldwide. — 1978. October. - P. 19-20.
139. Harris J.N. Mechanical Working of Metals: theory and Practice / John Noel Harris. - Burlington: Elsevier Science, 2014. - 252 p.
140. Holmberg K., Rourainen H., Matthews A. Coatings tribology - contact mechanisms and surface design // New Direction in Tribology/ Pienary and Invited Papers from the First Word Tribology Congress, 8... 12 sep. London -1997.- p. 252...268.

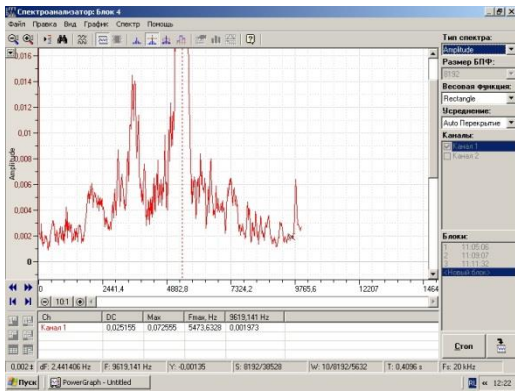
141. Kragelsky I.V. Friction and Wear: Calculation Methods / I.V. Kragelsky, M.N. Dobychin, V.S. Kombatov; Elsevier Science & Technology, 1982.-450 p.
142. Niku - Laria/ Method de la fleche, method de la source des constraints residu-elles // Proceedings 1-st International Conference jn Shot Peening. Paris, septem-dre 1981, p. 34...247.
143. Singal R. K. Fundamentals of Machining and Machine Tools / R. K. Singal, Mridul Singal, Rishi Singal. - I K International Publishing House, 2008. – 368 p.
144. Selecting Bearing Materials / J. M: Conway-Jones. B. 367174. - Reprinted from June 1974. North American Edition of Diesel und Gas Turbine Progress.
145. Sproless, E. S. The mechanism of material removal in fretting / E. S. Sproless, D. J. Duguet // Wear. - 1978. - V.49. - № 2. - P. 339-352.
146. Sugimura Y., Lim P. Shih C.F., Suresh S. Fracturu normal to a biomaterial inter-face; effects of plasticity on crack - tip Shielding and amplification // Acta Metall. Mater 1995, № 43. p. 11...57.
147. Surface Hardening of Steels: understanding the Basics / Edited by J.R. Davis. - ASM International, 2002. – 364 p.
148. Vibration sound processing in an elastic environment and a device for its implementation / S. Kovalevskyy, S. Matvienko, I. Starodubcev, O. Lukichov // 13<sup>th</sup> International conference "Research and Development in Mechanical Industry."— RaDMI 2013, 12–15 September. – Kopaonik, Serbia, 2013. – P. 205–211.
149. Warrinez, J.F. Thin scell bearings for Medium Speed Diesel Engine und Users As-sotiation / J. F. Warrinez. Publication 364. — 1975. - February. — 20 p.
150. [http://sdo.irkgups.ru/courses\\_data/23/kurs\\_lektsii,\\_uchebnoe\\_posobie\\_po\\_distiplin e/USiP/doc/tehmash/stm1str6tab4.htm](http://sdo.irkgups.ru/courses_data/23/kurs_lektsii,_uchebnoe_posobie_po_distiplin e/USiP/doc/tehmash/stm1str6tab4.htm).

ПРИЛОЖЕНИЕ П1 ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ  
РАЗМЕРОВ КОНЦЕНТРАТОРА ЗКС

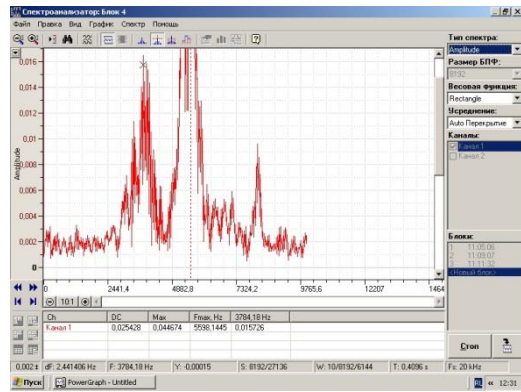
1	2	3
!modal+harmonic - нагрузка к управляющим узлам, !все правильно	MPDATA,DENS,1,,7826 MPTEMP,,,,,,,,, MPTEMP,1,0 MPDATA,DAMP,1,,0.05 SAVE	SAVE /STATUS,SOLU SOLVE FINISH /POST1 SET,LIST, finish
/PREP7	ESIZE,4e-3,0, MSHKEY,0 MSHAPE,1,3d FLST,5,4,6,ORDE,2 FITEM,5,1 FITEM,5,-4 CM,_Y,VOLU VSEL, , , ,P51X CM,_Y1,VOLU CHKMSH,'VOLU' CMSEL,S,_Y !* VMESH,_Y1 !* CMDELE,_Y CMDELE,_Y1 CMDELE,_Y2 !* FINISH	/SOLU !* ANTYPE,3 !* HROPT,MSUP, , ,0 HROUT,ON,ON, LUMPM,0 !* csys,1 nsel,s,loc,z,0 nsel,r,loc,x,7e-3,18e-3 f,all,fz,0.00005 allsel,all csys,0
*SET,a,30e-3 *SET,b,120e-3 *SET,r,a-6e-3 *SET,c,30e-3 /units,si		
K,1,0,0,0, K,2,0,0,c, K,3,0,0,c+r, K,4,0,0,b, K,5,0,0,b+12e-3, K,6,0,4e-3,b+12e-3, K,7,0,0.006,b, K,8,0,0.006,c+r, K,9,0,a,c, K,10,0,a,c+r, K,11,0,a,0, K,12,0,7e-3,0, K,13,0,0.007,-100e-3, K,14,0,0,-0.1, K,15,0,4e-3,b, K,15,0,0.004,b,		
LSTR, 14, 5 LSTR, 5, 6 LSTR, 6, 15 LSTR, 15, 7 LSTR, 7, 8 LSTR, 9, 11 LSTR, 11, 12 LSTR, 12, 13 LSTR, 13, 14 !* LARC,9,8,10,r, FLST,2,10,4 FITEM,2,9 FITEM,2,8 FITEM,2,7 FITEM,2,6	/SOL ANTYPE,2 MODOPT,REDUC,10 EQSLV,FRONT MXPAND,10,700,9000,yes LUMPM,0 PSTRES,0 !* MODOPT,REDUC,10,700, 9000,10,off outres,erase outres,nsol,all outres,esol,all SAVE SOLVE finish /POST1 SET,LIST,999 set,,,,,,,,,1 AVPRIN,0, , ETABLE,evolu,VOLU, SSUM	

<pre> FITEM,2,10 FITEM,2,5 FITEM,2,4 FITEM,2,3 FITEM,2,2 FITEM,2,1 AL,P51X FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,1 FLST,8,2,3 FITEM,8,14 FITEM,8,5 VROTAT,P51X, , , , ,P51X, ,360, , SAVE !* ET,1,SOLID92 !* MPTEMP,,,,,,,, MPTEMP,1,0 MPDATA,EX,1,,2e11 MPDATA,PRXY,1,,0.3 MPTEMP,,,,,,,, MPTEMP,1,0 </pre>	<pre> TOTAL,80,1 allsel,all /nerr,100,100000,,off csys,1 nsel,s,loc,z,-100e-3 nsel,r,loc,x,0,7e-3 d,all,all allsel,all nsel,s,loc,z,-100e-3,0 nsel,r,loc,x,0,7e-3 d,all,ux,0 d,all,uy,0 allsel,all csys,0 </pre>	<pre> *GET,vtot,SSUM, ,ITEM,EVOLU AVPRIN,0, , ETABLE,uz,U,Z nsort,u,z,0,1,, *get,uzmax,sort,,max AVPRIN,0, , ETABLE,ux,U,X nsort,u,x,0,1,, *get,uxmax,sort,,max !* AVPRIN,0, , ETABLE,uy,U,Y nsort,u,y,0,1,, *get,uymax,sort,,max Finish </pre>
--	--	---

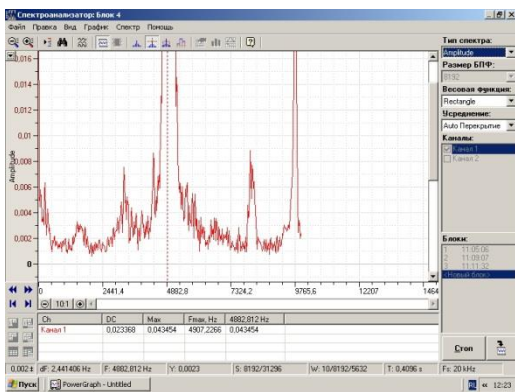
## ПРИЛОЖЕНИЕ П2. АЧХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБРАЗЦА ЗАКРЕПЛЕННОГО В ЗКС НА КОНЦЕНТРАТОРЕ №1



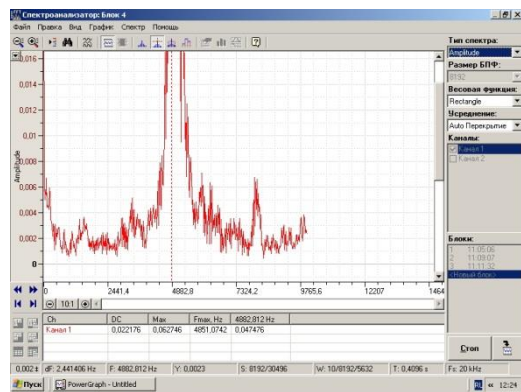
Ал 1.1



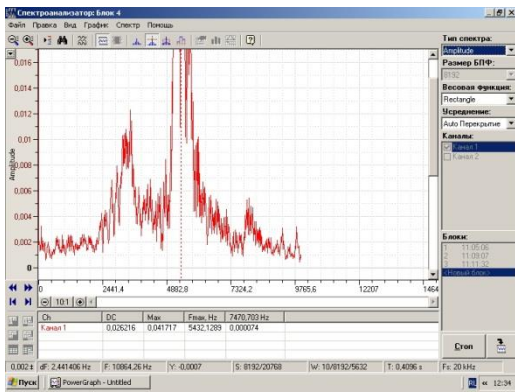
Ал 1.2



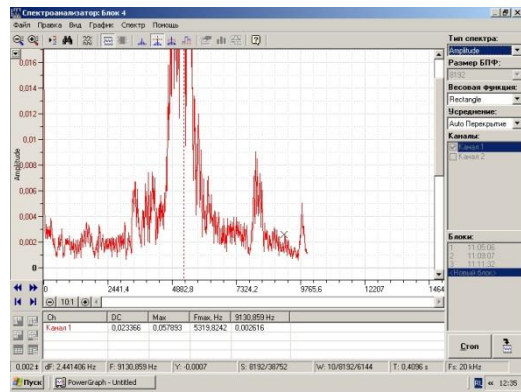
Ал 1.3



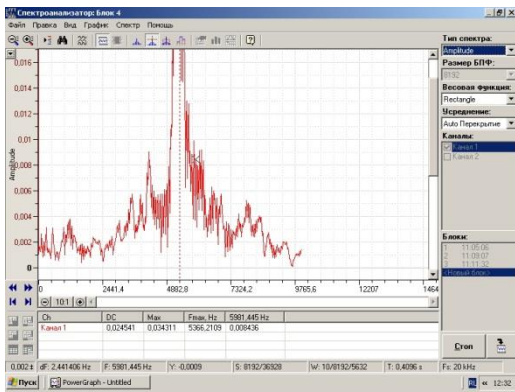
Ал 1.4



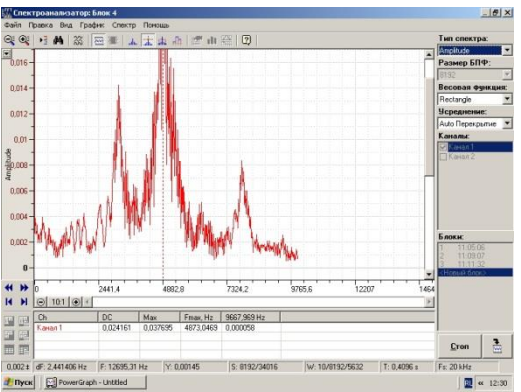
Ал 1.5



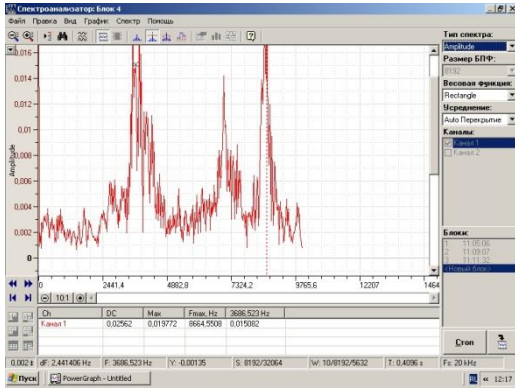
ал 1.6



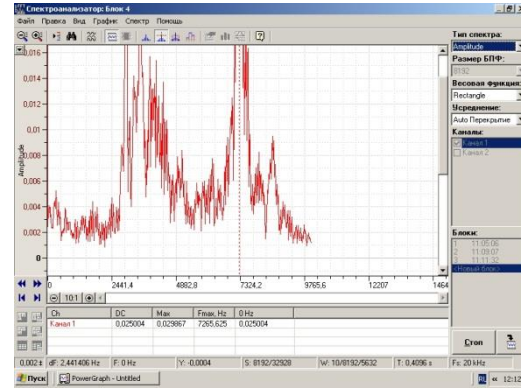
Ал 1.7



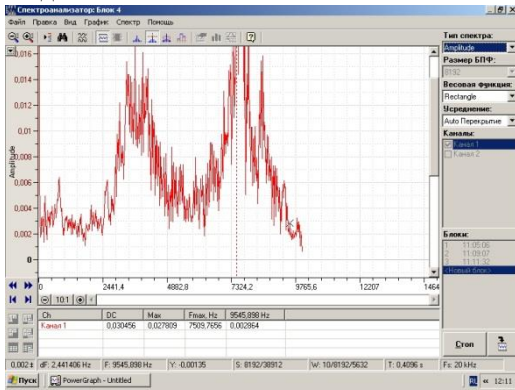
Ал 1.8



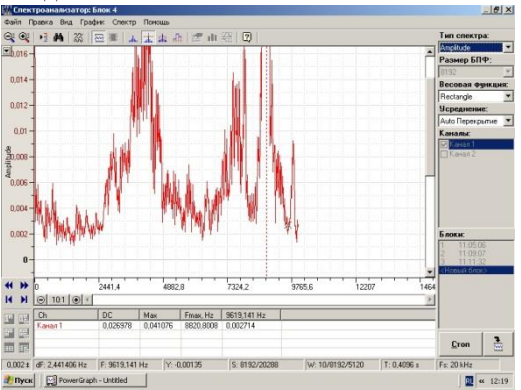
Медь 1.1



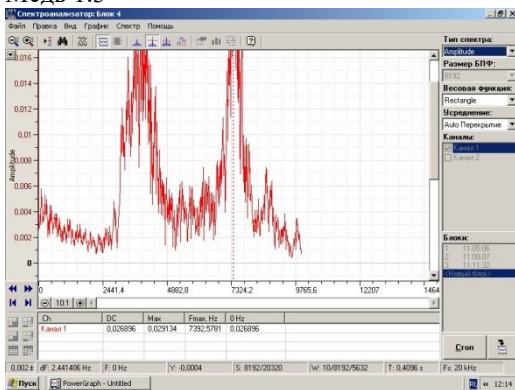
Медь 1.2



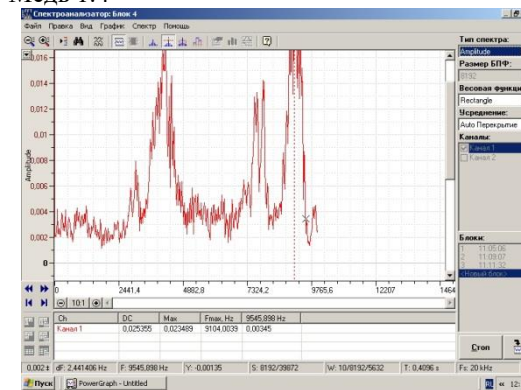
Медь 1.3



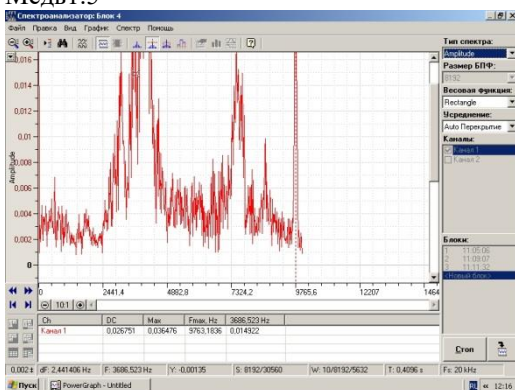
Медь 1.4



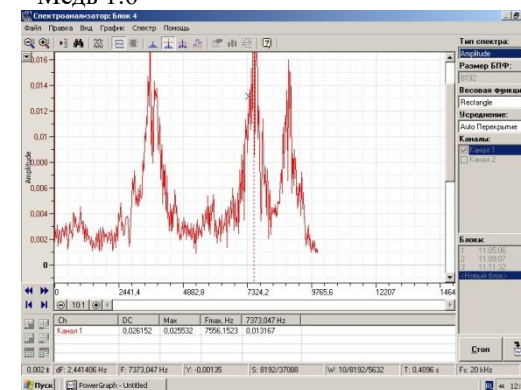
Медь 1.5



Медь 1.6



Медь 1.7

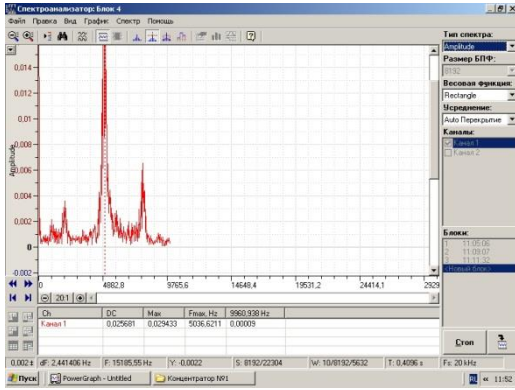


Медь 1.8

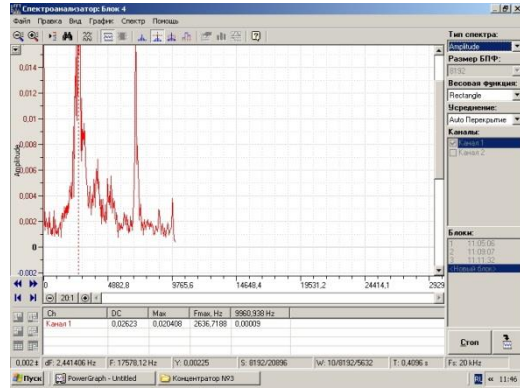
Медь 1.9

медь 1.12

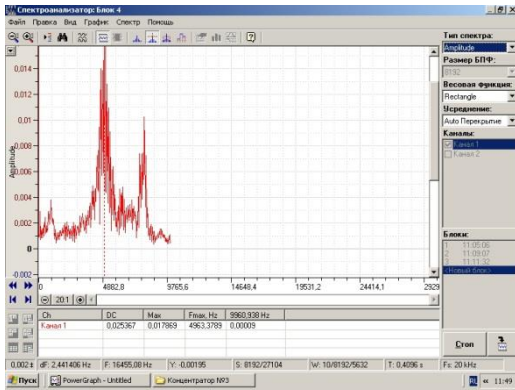




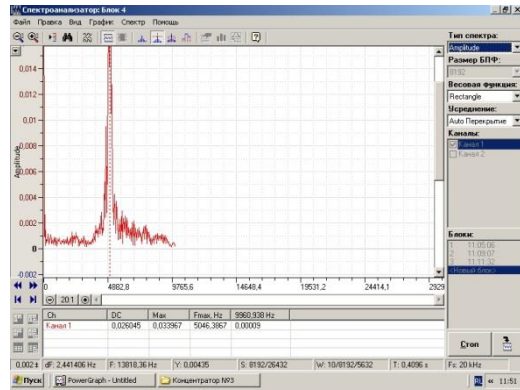
Сталь 1.2



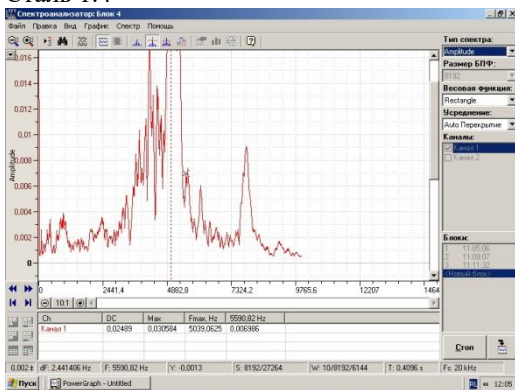
Сталь 1.3



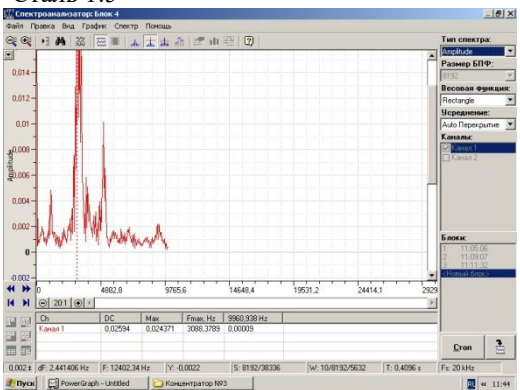
Сталь 1.4



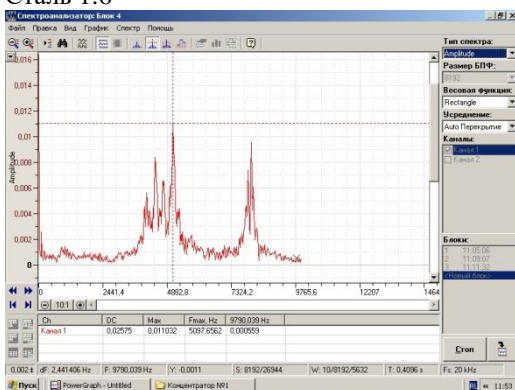
Сталь 1.5



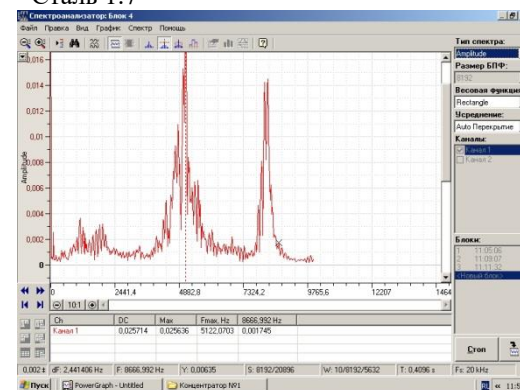
Сталь 1.6



Сталь 1.7

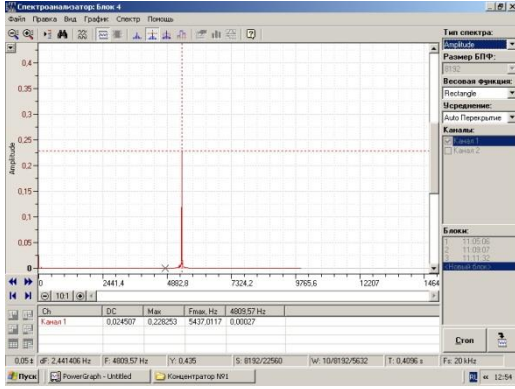


Сталь 1.8

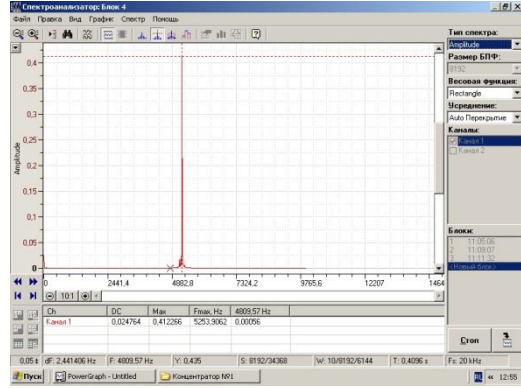


Сталь 1.9

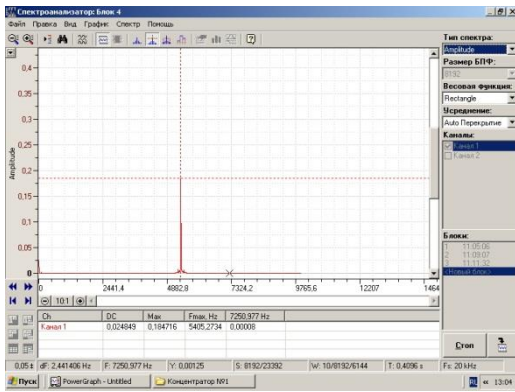
## ПРИЛОЖЕНИЕ ПЗ АЧХ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБРАЗЦА ЗАКРЕПЛЕННОГО В ЗКС НА КОНЦЕНТРАТОРЕ №1



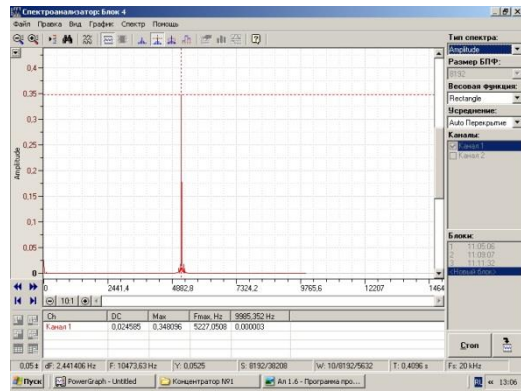
Ал 1.1



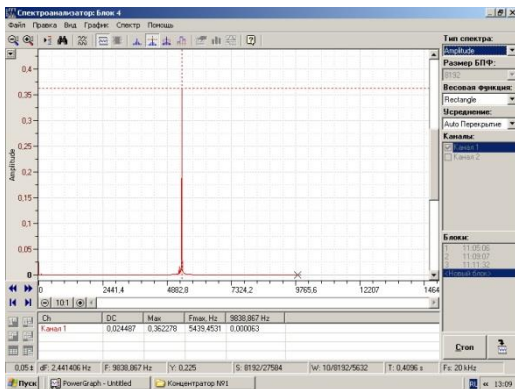
Ал 1.2



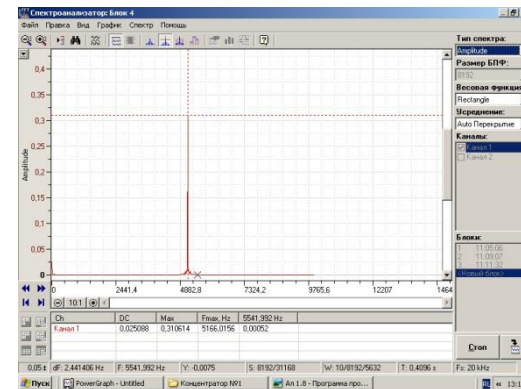
Ал 1.3



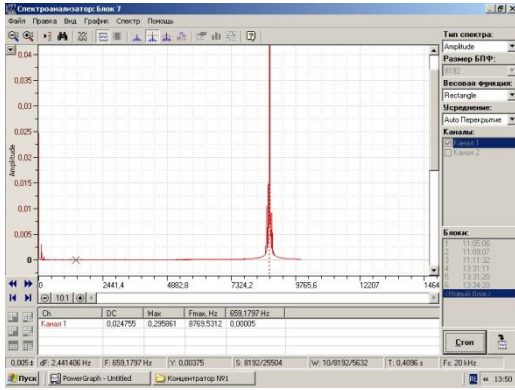
Ал 1.4



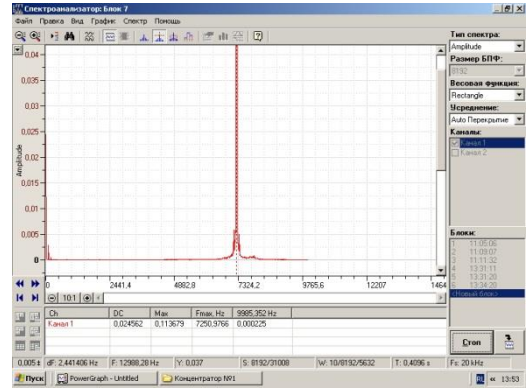
Ал 1.5



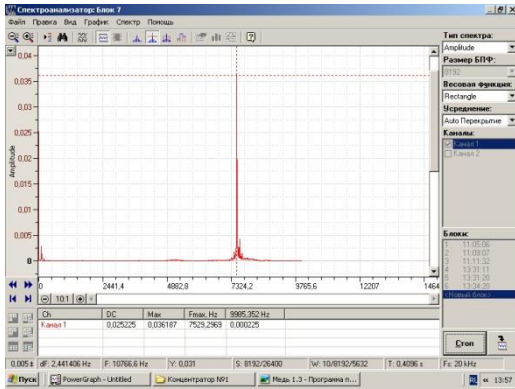
Ал 1.6



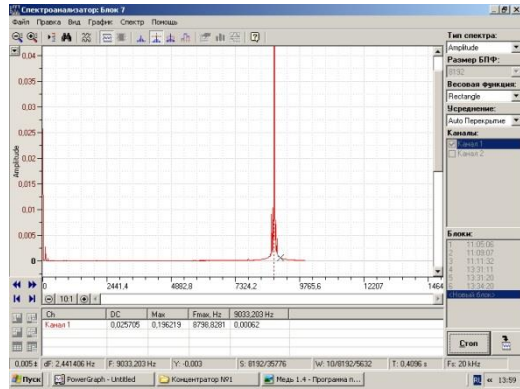
Медь 1.1



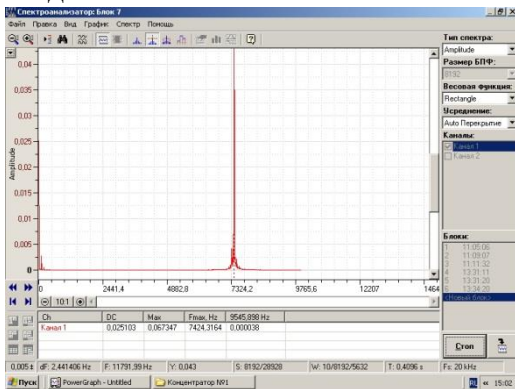
Медь 1.2



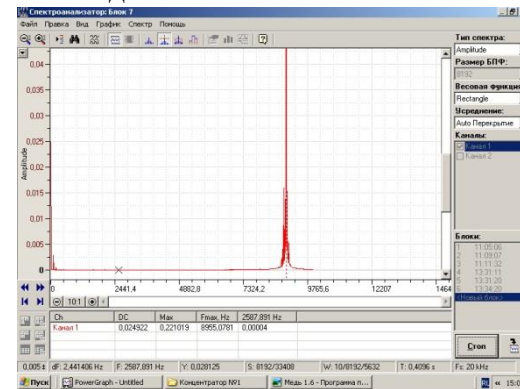
Медь 1.3



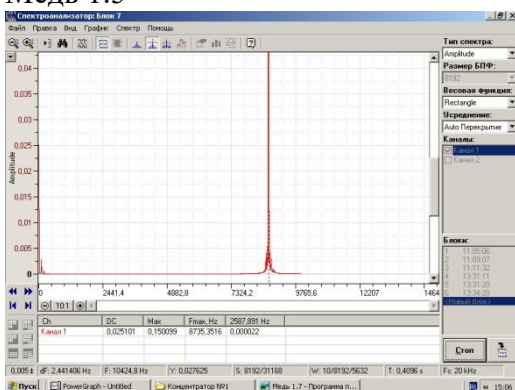
Медь 1.4



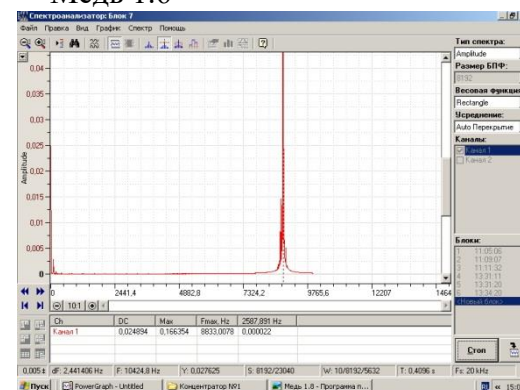
Медь 1.5



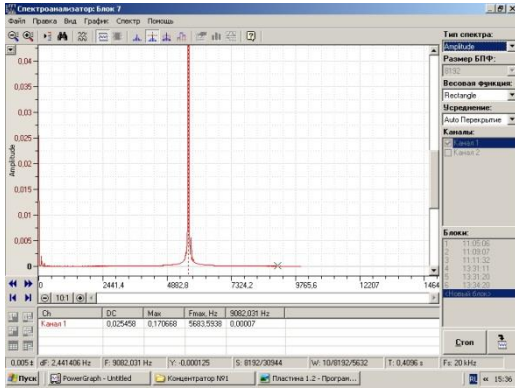
Медь 1.6



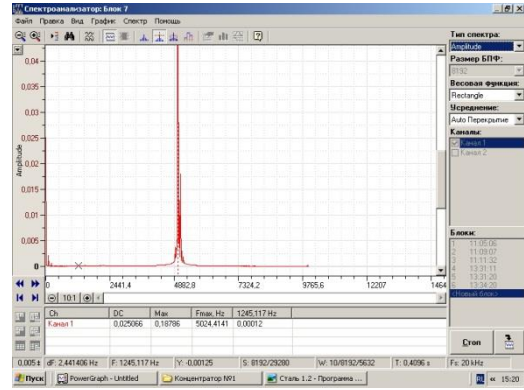
Медь 1.7



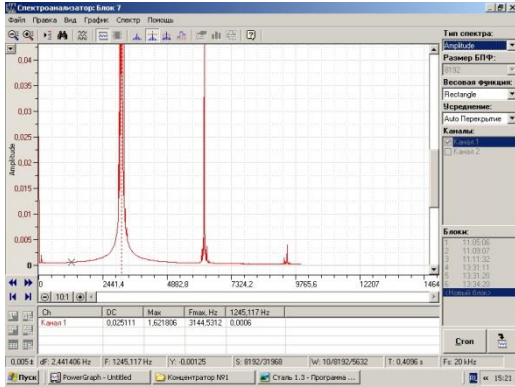
Медь 1.8



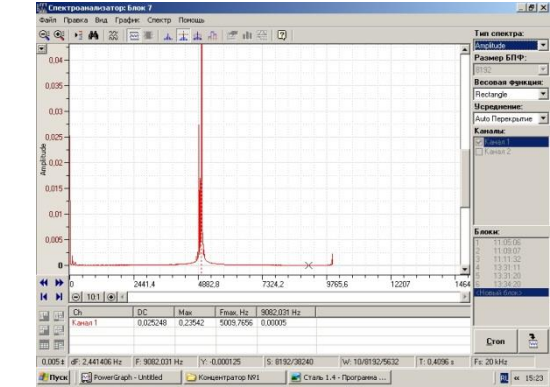
Сталь 1.1



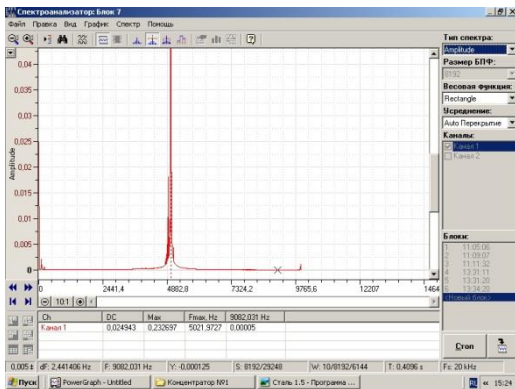
Сталь 1.2



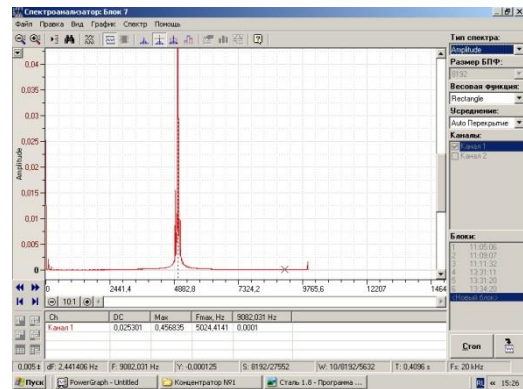
Сталь 1.3



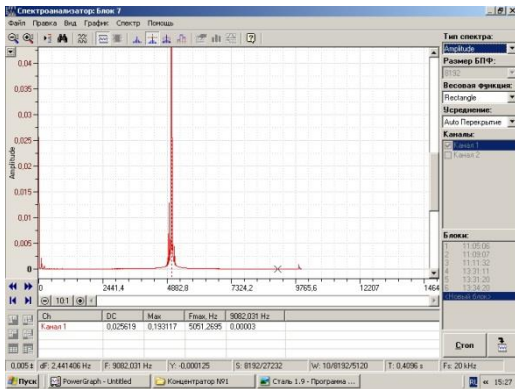
Сталь 1.4



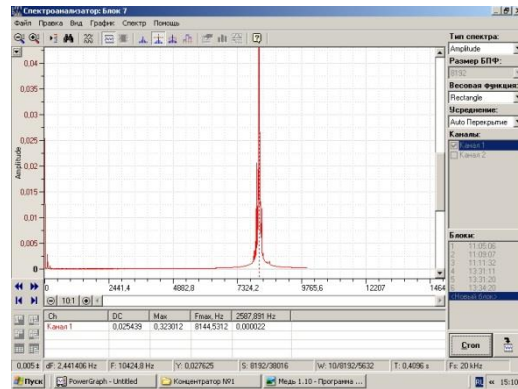
Сталь 1.5



Сталь 1.8



Сталь 1.9



Сталь 1.10

Сталь 1.11

Сталь 1.12

## ПРИЛОЖЕНИЕ П4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таблица П 4.1 - Номинальные размеры образцов (диаметр, мм), Алюминий

№ детали	Сечение 1-1 (верх)				Сечение 2-2 (середина)				Сечение 3-3 (низ)			
	А	В	С	Среднее	А	В	С	Среднее	А	В	С	Среднее
1.1	19,110	19,122	19,121	<b>19,118</b>	19,231	19,230	19,235	<b>19,232</b>	10,176	19,162	19,174	<b>19,171</b>
1.2	19,065	19,059	19,058	<b>19,061</b>	19,169	19,171	19,163	<b>19,168</b>	19,181	19,195	19,173	<b>19,183</b>
1.3	18,904	18,871	18,855	<b>18,875</b>	18,986	18,991	19,000	<b>18,992</b>	19,159	19,167	19,176	<b>19,167</b>
1.4	18,942	18,945	18,961	<b>18,949</b>	19,083	19,079	19,073	<b>19,078</b>	19,274	19,285	19,281	<b>19,280</b>
1.5	19,227	19,203	19,217	<b>19,216</b>	19,197	19,187	19,192	<b>19,192</b>	19,094	19,083	19,092	<b>19,090</b>
1.6	19,162	19,162	19,160	<b>19,161</b>	19,134	19,137	19,131	<b>19,134</b>	19,036	19,043	18,030	<b>19,036</b>
1.7	18,990	18,992	18,986	<b>18,989</b>	19,118	19,115	19,135	<b>19,122</b>	19,268	19,246	19,251	<b>10,255</b>
1.8	19,976	18,976	18,977	<b>18,976</b>	19,074	19,083	10,083	<b>19,080</b>	19,214	19,213	19,217	<b>19,215</b>
1.9	19,212	19,208	19,227	<b>19,216</b>	19,333	19,342	19,333	<b>19,336</b>	19,218	19,207	19,217	<b>19,214</b>
1.10	19,129	19,127	19,128	<b>19,128</b>	19,190	19,197	19,186	<b>19,191</b>	19,196	19,184	19,190	<b>19,190</b>
1.11	19,147	19,145	19,138	<b>19,143</b>	19,102	19,103	19,107	<b>19,104</b>	18,961	18,967	18,964	<b>18,964</b>
1.12	19,112	19,107	19,125	<b>19,115</b>	19,212	19,209	19,212	<b>19,211</b>	19,191	19,181	19,182	<b>19,185</b>

Таблица П 4.2 - Номинальные размеры образцов (диаметр, мм), Медь

№ детали	Сечение 1-1 (верх)				Сечение 2-2 (середина)				Сечение 3-3 (низ)			
	А	В	С	Среднее	А	В	С	Среднее	А	В	С	Среднее
1.1	13,530	13,508	13,525	<b>13,521</b>	13,391	13,407	13,399	<b>13,399</b>	13,262	13,260	13,268	<b>13,263</b>
1.2	13,697	13,709	13,714	<b>13,707</b>	13,606	13,619	13,615	<b>13,613</b>	13,477	13,468	13,477	<b>13,474</b>
1.3	13,471	13,460	13,483	<b>13,471</b>	13,497	13,493	13,493	<b>13,494</b>	13,583	13,582	13,592	<b>13,586</b>
1.4	13,321	13,313	13,345	<b>13,326</b>	13,434	13,432	13,444	<b>13,437</b>	13,514	13,470	13,491	<b>13,488</b>
1.5	13,569	13,568	13,567	<b>13,568</b>	13,497	13,505	13,500	<b>13,501</b>	13,391	13,387	13,384	<b>13,388</b>
1.6	13,727	13,718	13,701	<b>13,715</b>	13,602	13,602	13,601	<b>13,602</b>	13,441	13,434	13,440	<b>13,438</b>
1.7	13,323	13,321	13,330	<b>13,325</b>	13,397	13,407	13,400	<b>13,401</b>	13,490	13,480	13,492	<b>13,487</b>
1.8	13,646	13,634	13,634	<b>13,638</b>	13,509	13,514	13,520	<b>13,514</b>	13,355	13,341	13,345	<b>13,347</b>
?????												
1.10	13,577	13,560	13,554	<b>13,564</b>	13,474	13,473	13,461	<b>13,469</b>	13,361	13,361	13,352	<b>13,358</b>
?????	13,378	13,384	13,382	<b>13,381</b>	13,482	13,478	13,479	<b>13,480</b>	13,543	13,550	13,541	<b>13,545</b>
1.12	13,675	13,681	13,682	<b>13,679</b>	13,568	13,574	13,570	<b>13,571</b>	13,406	13,401	13,411	<b>13,406</b>

Таблица П 4.3 - Обработка образца (цилиндр, диаметр 19 мм, алюминий), в масле И-40, частота 4400 Гц, амплитуда 45 МКМ.

Сечение 1-1 в масло не погружалось

Деталь 1.4 Параметры шероховатости		Сечение 1-1					Сечение 2-2					Сечение 3-3				
		A	B	C	D	Среднее	A	B	C	D	Среднее	A	B	C	D	Среднее
Ra	Исходная	1,425	1,485	1,543	2,414	1,484	1,806	1,851	1,604		1,754	0,983	1,06	1,108		1,05
	После 15 минут	<b>2.252</b>	<b>2.263</b>	<b>2.560</b>	<b>2.518</b>	<b>2.398</b>	<b>1.676</b>	<b>1.645</b>	<b>1.433</b>	<b>1.094</b>	<b>1.462</b>	<b>0.976</b>	<b>0.886</b>	<b>1.047</b>	<b>0.992</b>	<b>0.975</b>
Rq	Исходная	1,754	1,82	2,072	3,048	1,882	2,27	2,334	1,994		2,199	1,217	1,324	1,377		1,29
	После 15 минут	<b>2.842</b>	<b>2.981</b>	<b>3.436</b>	<b>3.242</b>	<b>3.100</b>	<b>2.095</b>	<b>2.160</b>	<b>1.436</b>	<b>1.794</b>	<b>2.085</b>	<b>1.247</b>	<b>1.134</b>	<b>1.284</b>	<b>1.229</b>	<b>1.223</b>
Rz	Исходная	8,215	9,263	10,11	14,21	9,196	11,49	11,37	9,84		10,9	6,787	7,015	6,719		6,84
	После 15 минут	<b>14.51</b>	<b>15.35</b>	<b>17.56</b>	<b>16.55</b>	<b>15.99</b>	<b>10.40</b>	<b>11.72</b>	<b>8.279</b>	<b>9.079</b>	<b>9.87</b>	<b>6.808</b>	<b>6.111</b>	<b>6.760</b>	<b>6.320</b>	<b>5</b>
Rt	Исходная	10,88	15,03	13,0	18,31	12,97	20,07	18,52	13,43		14,007	10,35	9,64	8,359		9,45
	После 15 минут	<b>20.31</b>	<b>24.92</b>	<b>23.63</b>	<b>25.39</b>	<b>23.56</b>	<b>14.19</b>	<b>16.87</b>	<b>14.150</b>	<b>11.150</b>	<b>14.09</b>	<b>8.199</b>	<b>6.88</b>	<b>7.84</b>	<b>7.4</b>	<b>7.600</b>
Rp	Исходная	4,007	4,38	5,31	6,247	4,566	5,144	5,167	4,328		4,88	2,93	3,48	3,184		3,198
	После 15 минут	<b>6.32</b>	<b>6.407</b>	<b>6.855</b>	<b>6.00</b>	<b>6.395</b>	<b>4.912</b>	<b>4.360</b>	<b>3.279</b>	<b>4.223</b>	<b>4.193</b>	<b>3.519</b>	<b>2.983</b>	<b>3.432</b>	<b>3.007</b>	<b>3.235</b>
Rv	Исходная	4,2	4,93	4,8	7,9	4,643	6,38	6,2	5,51		6,03	3,88	3,52	3,53		3,643
	После 15 минут	<b>8.1</b>	<b>8.9</b>	<b>10.71</b>	<b>10.5</b>	<b>9.552</b>	<b>5.495</b>	<b>7.36</b>	<b>5</b>	<b>4.85</b>	<b>5.676</b>	<b>3.287</b>	<b>3.127</b>	<b>3.327</b>	<b>3.312</b>	<b>3.263</b>
Rs	Исходная	0,102	0,128	0,118	0,14	0,116	0,192	0,16	0,113		0,155	0,109	0,087	0,079		0,092
	После 15 минут	<b>0.167</b>	<b>0.198</b>	<b>0.195</b>	<b>0.205</b>	<b>0.191</b>	<b>0.116</b>	<b>0.137</b>	<b>0.136</b>	<b>0.098</b>	<b>0.121</b>	<b>0.090</b>	<b>0.084</b>	<b>0.084</b>	<b>0.083</b>	<b>0.085</b>
Rs <sub>m</sub>	Исходная	0,245	0,255	0,231	0,305	0,244	0,391	0,338	0,255		0,328	0,202	0,16	0,151		0,171
	После 15 минут	<b>0.278</b>	<b>0.313</b>	<b>0.329</b>	<b>0.446</b>	<b>0.341</b>	<b>0.305</b>	<b>0.278</b>	<b>0.219</b>	<b>0.192</b>	<b>0.333</b>	<b>0.184</b>	<b>0.164</b>	<b>0.179</b>	<b>0.167</b>	<b>0.173</b>
t <sub>p</sub> 20%	Исходная	3,02	3,0	8,08		4,7	3,88	2,36	7,52		4,59	6,72	1,72	7,36		5,267
	После 15 минут	<b>3.04</b>	<b>3.88</b>	<b>7.64</b>	<b>19.68</b>	<b>8.56</b>	<b>5.12</b>	<b>19.52</b>	<b>17.52</b>	<b>7.44</b>	<b>12.4</b>	<b>2.00</b>	<b>4.2</b>	<b>2.56</b>	<b>6.12</b>	<b>3.74</b>
t <sub>p</sub> 30%	Исходная	11,92	5,68	25,2		14,267	17,76	6,48	27,48		17,24	24,2	7,4	18,8		16,8
	После 15 минут	<b>10.68</b>	<b>16.52</b>	<b>25.92</b>	<b>53.52</b>	<b>26.66</b>	<b>14.48</b>	<b>50.44</b>	<b>51.36</b>	<b>18.88</b>	<b>33.79</b>	<b>6.36</b>	<b>11.72</b>	<b>8.00</b>	<b>17.88</b>	<b>10.99</b>
t <sub>p</sub> 40%	Исходная	28,7	14,4	70,4		37,83	47,88	18,32	53,72		39,97	50,84	22	39,6		37,48
	После 15 минут	<b>35.08</b>	<b>50.64</b>	<b>60.36</b>	<b>80.16</b>	<b>56.56</b>	<b>37.72</b>	<b>81.00</b>	<b>89.44</b>	<b>37.16</b>	<b>61.33</b>	<b>17.56</b>	<b>28.00</b>	<b>22.52</b>	<b>40.52</b>	<b>27.15</b>
t <sub>p</sub> 50%	Исходная	55,08	39,6	89,72		61,467	80,88	50	76,92		69,27	83,28	47,24	61,8		64,107
	После 15 минут	<b>86.6</b>	<b>83.68</b>	<b>83.80</b>	<b>94.24</b>	<b>87.08</b>	<b>63.76</b>	<b>94.12</b>	<b>98.16</b>	<b>61.8</b>	<b>79.46</b>	<b>36.84</b>	<b>53.68</b>	<b>44.12</b>	<b>63.60</b>	<b>49.56</b>
t <sub>p</sub> 80%	Исходная	95,44	94,84	99		96,427	99,76	98,76	98,76		99,09	99,68	98,42	97,72		98,61
	После 15 минут	<b>97.84</b>	<b>98.56</b>	<b>97.96</b>	<b>99.16</b>	<b>98.38</b>	<b>98.28</b>	<b>98.80</b>	<b>99.56</b>	<b>97.72</b>	<b>98.59</b>	<b>95.04</b>	<b>96.32</b>	<b>95.60</b>	<b>97.72</b>	<b>96.17</b>

Обработка деталей (цилиндр, диаметр 19 мм, алюминий). Измерение шероховатости.  
 Обработка 10 минут, в масле, частота 4473 амплитуда 0,4...0,5. Сечение 1-1 в масло не погружалось

Деталь 1.3+ Параметры шероховатости		Сечение 1-1					Сечение 2-2					Сечение 3-3				
		A	B	C	D	Сред-нее	A	B	C	D	Сред-нее	A	B	C	D	Сред-нее
Ra	Исходная	2,374	2,512	2,338	2,217	<b>2,36</b>	1,632	1,619	1,61		<b>1,62</b>	1,155	1,387	1,192	1,559	<b>1,323</b>
	После 15 минут	<b>1,871</b>	<b>2,237</b>	<b>2,229</b>	<b>2,195</b>	<b>2,133</b>	<b>1,917</b>	<b>1,688</b>	<b>1,925</b>	<b>1,593</b>	<b>1,781</b>	<b>1,369</b>	<b>1,249</b>	<b>1,212</b>	<b>1,422</b>	<b>1,313</b>
	+20 минут	<b>2.045</b>	<b>2.065</b>	<b>1.971</b>	<b>1.933</b>	<b>2.003</b>	<i>2.646</i>	<i>2.401</i>	<i>2.077</i>	<i>2.567</i>	<i>2.423</i>	<i>1.159</i>	<i>1.108</i>	<i>1.406</i>	<i>1.214</i>	<i>1.221</i>
Rq	Исходная	3,100	3,09	2,958	2,917	<b>3,016</b>	2,032	2,099	2,078		<b>2,07</b>	1,48	1,727	1,542	1,984	<b>1,683</b>
	После 15 минут	<b>2,406</b>	<b>2,791</b>	<b>2,793</b>	<b>2,713</b>	<b>2,676</b>	<b>2,371</b>	<b>2,099</b>	<b>2,431</b>	<b>2,042</b>	<b>2,236</b>	<b>1,693</b>	<b>1,55</b>	<b>1,568</b>	<b>1,757</b>	<b>1,642</b>
	+20 минут	<b>2.595</b>	<b>2.733</b>	<b>2.574</b>	<b>2.512</b>	<b>2.603</b>	<i>3.312</i>	<i>3.023</i>	<i>2.665</i>	<i>3.221</i>	<i>3.055</i>	<i>1.419</i>	<i>1.383</i>	<i>1.737</i>	<i>1.507</i>	<i>1.511</i>
Rz	Исходная	16,36	14,39	13,68	13,63	<b>14,515</b>	9,616	10,88	11,0		<b>10,499</b>	8,064	8,0	8,055	8,656	<b>8,194</b>
	После 15 минут	<b>11,92</b>	<b>13,78</b>	<b>13,0</b>	<b>12,67</b>	<b>12,843</b>	<b>11,6</b>	<b>10,57</b>	<b>12,34</b>	<b>10,4</b>	<b>11,228</b>	<b>8,592</b>	<b>8,631</b>	<b>8,432</b>	<b>8,840</b>	<b>8,616</b>
	+20 минут	<b>12.56</b>	<b>13.19</b>	<b>12.47</b>	<b>12.87</b>	<b>12.772</b>	<i>15.00</i>	<i>13.350</i>	<i>12.630</i>	<i>15.640</i>	<i>14.155</i>	<i>7.167</i>	<i>7.184</i>	<i>9.015</i>	<i>6.935</i>	<i>7.575</i>
Rt	Исходная	24,87	20,2	22,36	21,6	<b>22,258</b>	11,31	13,64	13,96		<b>12,637</b>	12,27	11,96	13,15	12,27	<b>12,413</b>
	После 15 минут	<b>18,63</b>	<b>16,79</b>	<b>17,04</b>	<b>20,39</b>	<b>18,19</b>	<b>15,84</b>	<b>14,52</b>	<b>16,79</b>	<b>18,95</b>	<b>16,525</b>	<b>9,84</b>	<b>11,19</b>	<b>13,8</b>	<b>10,8</b>	<b>11,408</b>
	+20 минут	<b>16.63</b>	<b>18.76</b>	<b>16.2</b>	<b>19.44</b>	<b>17.75</b>	<b>24.630</b>	<b>22.79</b>	<b>15.47</b>	<b>22.04</b>	<b>21.233</b>	<b>10.35</b>	<b>9.039</b>	<b>11.6</b>	<b>10.47</b>	<b>10.36</b>
Rp	Исходная	7,087	6,207	5,447	5,127	<b>5,967</b>	4,136	4,544	4,44		<b>4,373</b>	4,223	3,367	3,943	3,687	<b>3,805</b>
	После 15 минут	<b>5,312</b>	<b>5,295</b>	<b>5,368</b>	<b>6,007</b>	<b>5,496</b>	<b>4,935</b>	<b>4,88</b>	<b>5,11</b>	<b>4,288</b>	<b>4,803</b>	<b>4,032</b>	<b>3,815</b>	<b>3,64</b>	<b>4,056</b>	<b>3,886</b>
	+20 минут	<b>5.4</b>	<b>5.288</b>	<b>4.96</b>	<b>5.144</b>	<b>5.198</b>	<b>5.872</b>	<b>5.584</b>	<b>4.848</b>	<b>7.015</b>	<b>5.829</b>	<b>2.232</b>	<b>3.407</b>	<b>4.223</b>	<b>3.296</b>	<b>3.289</b>
Rv	Исходная	9,2	8,1	9,2	8,5	<b>8,75</b>	5,48	6,31	6,54		<b>6,11</b>	3,83	4,63	4,11	4,96	<b>4,383</b>
	После 15 минут	<b>6,65</b>	<b>8,41</b>	<b>7,63</b>	<b>6,68</b>	<b>7,343</b>	<b>6,67</b>	<b>5,69</b>	<b>7,23</b>	<b>6,111</b>	<b>6,408</b>	<b>4,559</b>	<b>3,815</b>	<b>4,793</b>	<b>4,7</b>	<b>4,467</b>
	+20 минут	<b>7.167</b>	<b>7.904</b>	<b>7.512</b>	<b>7.727</b>	<b>7.577</b>	<b>9.135</b>	<b>9.455</b>	<b>7.784</b>	<b>8.631</b>	<b>8.751</b>	<b>3.936</b>	<b>3.776</b>	<b>4.792</b>	<b>3.640</b>	<b>4.036</b>
Rs	Исходная	0,189	0,154	0,149	0,154	<b>0,162</b>	0,109	0,129	0,116		<b>0,118</b>	0,124	0,118	0,129	0,124	<b>0,124</b>
	После 15 минут	<b>0,187</b>	<b>0,137</b>	<b>0,151</b>	<b>0,164</b>	<b>0,16</b>	<b>0,13</b>	<b>0,137</b>	<b>0,129</b>	<b>0,174</b>	<b>0,143</b>	<b>0,108</b>	<b>0,109</b>	<b>0,152</b>	<b>0,115</b>	<b>0,121</b>
	+20 минут	<b>0.145</b>	<b>0.149</b>	<b>0.145</b>	<b>0.171</b>	<b>0.152</b>	<b>0.208</b>	<b>0.216</b>	<b>0.16</b>	<b>0.192</b>	<b>0.194</b>	<b>0.107</b>	<b>0.091</b>	<b>0.119</b>	<b>0.110</b>	<b>0.107</b>
Rsm	Исходная	0,266	0,26	0,223	0,245	<b>0,249</b>	0,266	0,231	0,231		<b>0,243</b>	0,25	0,284	0,25	0,26	<b>0,261</b>
	После 15 минут	<b>0,24</b>	<b>0,216</b>	<b>0,208</b>	<b>0,25</b>	<b>0,229</b>	<b>0,278</b>	<b>0,227</b>	<b>0,26</b>	<b>0,347</b>	<b>0,278</b>	<b>0,227</b>	<b>0,212</b>	<b>0,305</b>	<b>0,272</b>	<b>0,254</b>

	+20 минут	<b>0.284</b>	<b>0.260</b>	<b>0.24</b>	<b>0.305</b>	<b>0.272</b>	<b>0.463</b>	<b>0.517</b>	<b>0.26</b>	<b>0.305</b>	<b>0.386</b>	<b>0.212</b>	<b>0.189</b>	<b>0.321</b>	<b>0.291</b>	<b>0.253</b>
t <sub>p</sub> 20%	Исходная	1,64	7,64	4,08	17,44	<b>7,7</b>	10,16	7,88	16,96		<b>11,667</b>	1,28	5,32	4,28	5,52	<b>4,1</b>
	После 15 минут	<b>1,6</b>	<b>13,96</b>	<b>8,16</b>	<b>4,44</b>	<b>7,04</b>	<b>7,88</b>	<b>0,92</b>	<b>4,88</b>	<b>6,92</b>	<b>5,15</b>	<b>6,12</b>	<b>0,20</b>	<b>9,52</b>	<b>14,0</b>	<b>7,46</b>
	+20 минут	<b>9.8</b>	<b>9.88</b>	<b>4.12</b>	<b>1.28</b>	<b>6.27</b>	<b>4.04</b>	<b>5.56</b>	<b>13.48</b>	<b>4.6</b>	<b>6.92</b>	<b>3.8</b>	<b>2.8</b>	<b>1.36</b>	<b>3.88</b>	<b>2.96</b>
t <sub>p</sub> 30%	Исходная	3,16	24,04	15,26	47,16	<b>22,41</b>	25,24	28,52	43,76		<b>32,507</b>	5,2	24,0	5,56	14,44	<b>12,3</b>
	После 15 минут	<b>4,48</b>	<b>37,8</b>	<b>21,08</b>	<b>8,68</b>	<b>18,01</b>	<b>23,08</b>	<b>7,20</b>	<b>19,12</b>	<b>29,8</b>	<b>19,8</b>	<b>15,32</b>	<b>3,32</b>	<b>33,16</b>	<b>27,88</b>	<b>19,92</b>
	+20 минут	<b>28.72</b>	<b>31.88</b>	<b>22.24</b>	<b>2.12</b>		<b>16.16</b>	<b>14.12</b>	<b>36.56</b>	<b>11.64</b>		<b>11.72</b>	<b>12.32</b>	<b>7.92</b>	<b>13.40</b>	
t <sub>p</sub> 40%	Исходная	12,44	51,6	43,52	79,32	<b>46,72</b>	48,72	55,68	72,76		<b>59,05</b>	19,84	45,46	18,28	26,2	<b>27,45</b>
	После 15 минут	<b>20</b>	<b>59,52</b>	<b>42,08</b>	<b>21,88</b>	<b>35,87</b>	<b>45,88</b>	<b>26,32</b>	<b>46,92</b>	<b>72,36</b>	<b>47,87</b>	<b>34,56</b>	<b>13,68</b>	<b>70,96</b>	<b>46,28</b>	<b>41,37</b>
	+20 минут	<b>55.36</b>	<b>63.9</b>	<b>49.40</b>	<b>3.28</b>	<b>42.98</b>	<b>40.92</b>	<b>37.96</b>	<b>61.84</b>	<b>38.32</b>		<b>28.76</b>	<b>28.00</b>	<b>19.12</b>	<b>32.24</b>	
t <sub>p</sub> 50%	Исходная	46,0	73,9	71,24	90,96	<b>70,53</b>	70,08	80,8	87,6		<b>79,49</b>	48	70	51,84	53,48	<b>55,83</b>
	После 15 минут	<b>56,28</b>	<b>79,12</b>	<b>68,36</b>	<b>54,56</b>	<b>64,58</b>	<b>75,12</b>	<b>54,84</b>	<b>71,96</b>	<b>92,12</b>	<b>73,51</b>	<b>56,24</b>	<b>31,44</b>	<b>90,48</b>	<b>70,52</b>	<b>62,17</b>
	+20 минут	<b>78.68</b>	<b>83.52</b>	<b>75.72</b>	<b>42.48</b>	<b>69.6</b>	<b>73.12</b>	<b>69.80</b>	<b>77.92</b>	<b>68.48</b>		<b>53.32</b>	<b>48.36</b>	<b>37.76</b>	<b>58.48</b>	
t <sub>p</sub> 80%	Исходная	97,44	98,68	98,8	99,24	<b>98,54</b>	96,56	97,68	98,6		<b>97,61</b>	99,28	98,92	99,32	96,48	<b>98,5</b>
	После 15 минут	<b>97,12</b>	<b>98,68</b>	<b>97,12</b>	<b>98,2</b>	<b>97,78</b>	<b>98,76</b>	<b>97,32</b>	<b>98,48</b>	<b>99,16</b>	<b>98,43</b>	<b>97,48</b>	<b>96,84</b>	<b>99,84</b>	<b>98,92</b>	<b>98,27</b>
	+20 минут	<b>98.8</b>	<b>98.04</b>	<b>96.64</b>	<b>98.12</b>	<b>97.9</b>	<b>97.84</b>	<b>98.84</b>	<b>97.32</b>	<b>97.2</b>	<b>73.09</b>	<b>99.52</b>	<b>97.12</b>	<b>95.60</b>	<b>98.32</b>	<b>97.64</b>

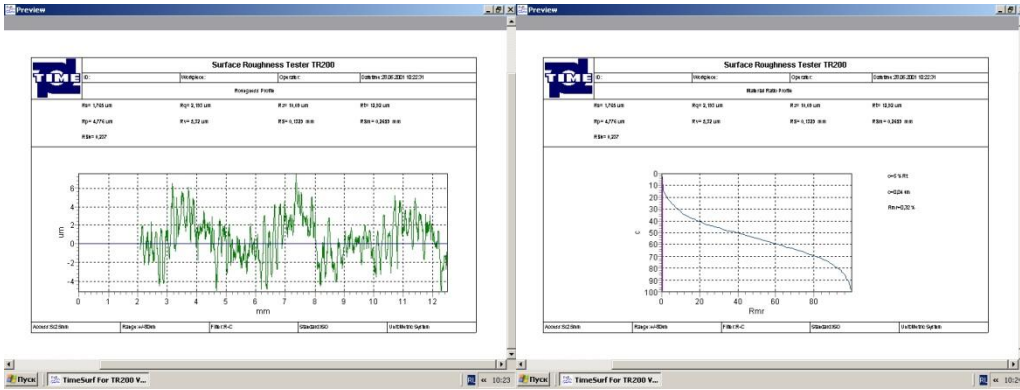


Обработка 15 минут, в масле, частота 4074, амплитуда 0,11...0,15. Сечение 1-1 в масло не погружалось.  
Вторая обработка 5мин. Третья обработка 10 мин в порошке с маслом

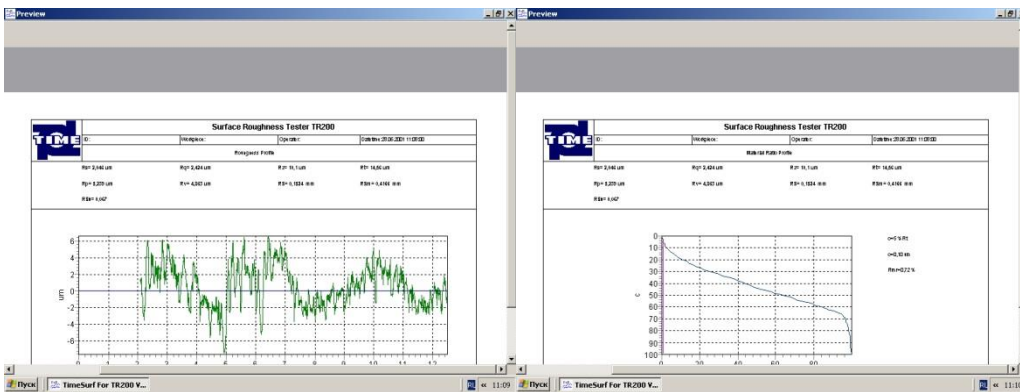
Деталь 1.2 Параметры шероховатости		Сечение 1-1					Сечение 2-2					Сечение 3-3				
		A	B	C	D	Сред- нее	A	B	C	D	Сред- нее	A	B	C	D	Сред- нее
Ra	Исходная	1,238	1,208	1,027		1,158	1,294	1,546	1,387		1,409	1,377	1,119	1,315	1,195	1,252
	После 15 минут	<b>1,023</b>	<b>1,054</b>	<b>1,129</b>	<b>1,026</b>	<b>1,058</b>	<b>1,406</b>	<b>1,227</b>	<b>1,277</b>	<b>1,334</b>	<b>1,311</b>	<b>1,308</b>	<b>1,148</b>	<b>1,317</b>	<b>1,252</b>	<b>1,256</b>
	+ 5минут	<b>1.183</b>	<b>1.360</b>	<b>1.190</b>	<b>1.220</b>	<b>1.238</b>	<b>1.379</b>	<b>1.356</b>	<b>1.533</b>	<b>1.868</b>	<b>1.534</b>	<b>1.292</b>	<b>1.203</b>	<b>1.415</b>	<b>1.460</b>	<b>1.343</b>
	+10мин.в порош											<b>1.466</b>	<b>1.439</b>	<b>1.431</b>		<b>1.44</b>
Rq	Исходная	1,574	1,426	1,26		1,42	1,558	1,837	1,665		1,687	1,748	1,405	1,577	1,487	1,554
	После 15 минут	<b>1,202</b>	<b>1,367</b>	<b>1,424</b>	<b>1,262</b>	<b>1,314</b>	<b>1,669</b>	<b>1,499</b>	<b>1,569</b>	<b>1,601</b>	<b>1,585</b>	<b>1,648</b>	<b>1,450</b>	<b>1,597</b>	<b>1,541</b>	<b>1,559</b>
	+5минут	<b>1.428</b>	<b>1.643</b>	<b>1.456</b>	<b>1.534</b>	<b>1.515</b>	<b>1.645</b>	<b>1.633</b>	<b>1.823</b>	<b>2.376</b>	<b>1.869</b>	<b>1.543</b>	<b>1.492</b>	<b>1.727</b>	<b>1.779</b>	<b>1.635</b>
	+10мин.в порош											<b>1.771</b>	<b>1.775</b>	<b>1.714</b>		<b>1.753</b>
Rz	Исходная	6,872	6,752	6,472		6,699	6,735	9,144	8,955		8,278	8,711	6,883	6,615	7,552	7,44
	После 15 минут	<b>6,752</b>	<b>7,368</b>	<b>7,239</b>	<b>7,024</b>	<b>7,096</b>	<b>7,735</b>	<b>6,744</b>	<b>7,735</b>	<b>7,76</b>	<b>7,494</b>	<b>7,96</b>	<b>7,407</b>	<b>7,384</b>	<b>7,624</b>	<b>7,594</b>
	+ 5минут	<b>6.272</b>		<b>7.047</b>	<b>7.592</b>	<b>7.245</b>	<b>7.400</b>	<b>7.495</b>	<b>8.495</b>	<b>11.080</b>	<b>8.797</b>	<b>7.264</b>	<b>7.407</b>	<b>8.265</b>	<b>8.199</b>	<b>7.783</b>
	+10мин.в порош		<b>8.072</b>									<b>7.167</b>	<b>7.119</b>	<b>7.912</b>		<b>7.399</b>
Rt	Исходная	8,56	9,64	8,0		8,733	9,76	9,72	10,76		10,08	13,31	9,399	8,6	10,64	10,487
	После 15 минут	<b>7,88</b>	<b>12,64</b>	<b>9,84</b>	<b>8,96</b>	<b>9,83</b>	<b>9,279</b>	<b>9,0</b>	<b>10,92</b>	<b>9,199</b>	<b>9,6</b>	<b>12,39</b>	<b>9,84</b>	<b>8,8</b>	<b>10,84</b>	<b>10,468</b>
	+ 5минут	<b>7.119</b>	<b>12.35</b>	<b>8.520</b>	<b>10.15</b>	<b>9.534</b>	<b>9.399</b>	<b>9.479</b>	<b>10.92</b>	<b>20.84</b>	<b>9.93</b>	<b>9.6</b>	<b>11.03</b>	<b>12.35</b>	<b>15.92</b>	<b>12.225</b>
	+10мин.в порош											<b>10.19</b>	<b>9.76</b>	<b>9.52</b>		<b>9.82</b>
Rp	Исходная	3,319	3,359	3,072		3,25	3,343	3,943	4,79		4,025	4,064	3,456	3,4	3,392	3,578
	После 15 минут	<b>3,407</b>	<b>3,256</b>	<b>3,405</b>	<b>3,302</b>	<b>3,343</b>	<b>3,496</b>	<b>3,823</b>	<b>4,047</b>	<b>3,943</b>	<b>3,827</b>	<b>3,847</b>	<b>4,119</b>	<b>3,359</b>	<b>3,447</b>	<b>3,693</b>
	+ 5минут	<b>3.055</b>	<b>3.823</b>	<b>3.623</b>	<b>3.825</b>	<b>3.581</b>	<b>3.712</b>	<b>3.983</b>	<b>4.144</b>	<b>5.535</b>	<b>4.343</b>	<b>3.783</b>	<b>3.712</b>	<b>3.392</b>	<b>3.256</b>	<b>3.535</b>
	+10мин.в порош											<b>3.88</b>	<b>3.592</b>	<b>3.376</b>		<b>3.616</b>
Rv	Исходная	3,55	3,39	3,4		3,445	3,39	4,1	3,9		3,797	4,6	3,43	3,21	4,11	3,838
	После 15 минут	<b>3,3</b>	<b>4,11</b>	<b>3,83</b>	<b>3,95</b>	<b>3,798</b>	<b>4,23</b>	<b>2,921</b>	<b>3,6</b>	<b>3,81</b>	<b>3,64</b>	<b>4,13</b>	<b>3,28</b>	<b>4,02</b>	<b>4,17</b>	<b>3,9</b>
	+ 5минут	<b>3.216</b>	<b>4.247</b>	<b>3.424</b>	<b>3.767</b>	<b>3.663</b>	<b>3.687</b>	<b>3.512</b>	<b>4.352</b>	<b>5.552</b>	<b>4</b>	<b>3.48</b>	<b>3.696</b>	<b>4.903</b>	<b>4.943</b>	<b>4.255</b>
	+10мин.в порош											<b>3.287</b>	<b>3.527</b>	<b>4.176</b>		<b>3.663</b>

Rs	Исходная	0,090	0,096	0,082		<b>0,089</b>	0,092	0,1	0,099		<b>0,097</b>	0,118	0,096	0,084	0,102	0,100
	После 15 минут	<b>0,08</b>	<b>0,126</b>	<b>0,093</b>	<b>0,082</b>	<b>0,095</b>	<b>0,087</b>	<b>0,09</b>	<b>0,102</b>	<b>0,088</b>	<b>0,092</b>	<b>0,111</b>	<b>0,097</b>	<b>0,089</b>	<b>0,098</b>	<b>0,099</b>
	+ 5 минут	<b>0,076</b>	<b>0,113</b>	<b>0,084</b>	<b>0,096</b>	<b>0,092</b>	<b>0,093</b>	<b>0,097</b>	<b>0,102</b>	<b>0,227</b>	<b>0,129</b>	<b>0,095</b>	<b>0,109</b>	<b>0,158</b>	<b>0,160</b>	<b>0,130</b>
	+10мин.в порош											<b>0,1</b>	<b>0,099</b>	<b>0,092</b>		<b>0,097</b>
Rs <sub>m</sub>	Исходная	0,231	0,234	0,152		<b>0,206</b>	0,242	0,313	0,227		<b>0,261</b>	0,24	0,216	0,240	0,212	0,227
	После 15 минут	<b>0,156</b>	<b>0,205</b>	<b>0,158</b>	<b>0,132</b>	<b>0,163</b>	<b>0,298</b>	<b>0,189</b>	<b>0,223</b>	<b>0,284</b>	<b>0,249</b>	<b>0,219</b>	<b>0,202</b>	<b>0,192</b>	<b>0,189</b>	<b>0,201</b>
	+ 5 минут	<b>0,205</b>	<b>0,278</b>	<b>0,181</b>	<b>0,192</b>	<b>0,214</b>	<b>0,272</b>	<b>0,278</b>	<b>0,284</b>	<b>0,521</b>	<b>0,338</b>	<b>0,245</b>	<b>0,236</b>	<b>0,347</b>	<b>0,368</b>	<b>0,299</b>
	+10мин.в порош											<b>0,304</b>	<b>0,304</b>	<b>0,255</b>		<b>0,277</b>
t <sub>p</sub> 20%	Исходная	6,4	3,0	8,8		<b>6,067</b>	13,32	10,92	10,92		<b>11,72</b>	4,24	2,92	2,44	2,92	3,13
	После 15 минут	<b>2,68</b>	<b>10,68</b>	<b>2,8</b>	<b>3,44</b>	<b>4,9</b>	<b>8,88</b>	<b>1,96</b>	<b>0,32</b>	<b>6,26</b>	<b>4,355</b>	<b>5,44</b>	<b>0,96</b>	<b>7,12</b>	<b>6,16</b>	<b>4,92</b>
	+ 5 минут	<b>5,16</b>	<b>7,56</b>	<b>4,40</b>	<b>7,16</b>	<b>6,07</b>	<b>6,68</b>	<b>2,76</b>	<b>5,16</b>	<b>1,16</b>	<b>3,94</b>	<b>1,44</b>	<b>2,76</b>	<b>13,80</b>	<b>26,36</b>	<b>11,09</b>
	+10мин.в порош											<b>1,5</b>		<b>4,5</b>		<b>3</b>
t <sub>p</sub> 30%	Исходная	15,76	13,56	24,96		<b>18,09</b>	33,48	24,84	31,60		<b>29,97</b>	15,52	8,68	8,92	7,2	10,08
	После 15 минут	<b>7,84</b>	<b>37,42</b>	<b>10,96</b>	<b>15,92</b>	<b>18,04</b>	<b>26,8</b>	<b>5,96</b>	<b>2,20</b>	<b>18,32</b>	<b>13,32</b>	<b>14,6</b>	<b>5,12</b>	<b>16,24</b>	<b>18,52</b>	<b>13,62</b>
	+ 5 минут	<b>16,88</b>	<b>24,68</b>	<b>14,64</b>	<b>18,76</b>	<b>18,74</b>	<b>18,36</b>	<b>11,72</b>	<b>19,96</b>	<b>13,96</b>	<b>16</b>	<b>5,64</b>	<b>11,12</b>	<b>32,64</b>	<b>55,88</b>	<b>26,32</b>
	+10мин.в порош											<b>7</b>		<b>1,2</b>		<b>4,4</b>
t <sub>p</sub> 40%	Исходная	31,72	27,68	47,88		<b>35,73</b>	55,32	44,28	57,68		<b>52,427</b>	32,92	17,0	20,64	18,6	22,29
	После 15 минут	<b>23,0</b>	<b>75,68</b>	<b>21,56</b>	<b>41,68</b>	<b>40,23</b>	<b>43,8</b>	<b>15,96</b>	<b>10,0</b>	<b>37,4</b>	<b>26,79</b>	<b>32,8</b>	<b>14,12</b>	<b>31,68</b>	<b>36,08</b>	<b>28,67</b>
	+ 5 минут	<b>33,96</b>	<b>48,36</b>	<b>29,04</b>	<b>36,92</b>	<b>37,07</b>	<b>35,92</b>	<b>29,96</b>	<b>40,16</b>	<b>46,48</b>	<b>38,13</b>	<b>15,76</b>	<b>27,32</b>	<b>59,12</b>	<b>85,96</b>	<b>47,04</b>
	+10мин.в порош											<b>21,5</b>		<b>26,5</b>		<b>24</b>
t <sub>p</sub> 50%	Исходная	50,92	48,6	68,56		<b>56,03</b>	74,92	61,2	72,28		<b>69,467</b>	68,24	37,36	35,6	31	43,03
	После 15 минут	<b>46,56</b>	<b>95,2</b>	<b>45,16</b>	<b>65,84</b>	<b>63,19</b>	<b>62,1</b>	<b>32,82</b>	<b>26,0</b>	<b>58,84</b>	<b>44,94</b>	<b>63,8</b>	<b>27,92</b>	<b>49,48</b>	<b>64,4</b>	<b>51,4</b>
	+ 5 минут	<b>50,52</b>	<b>74,40</b>	<b>49,80</b>	<b>64,84</b>	<b>59,89</b>	<b>53,04</b>	<b>49,56</b>	<b>58,48</b>	<b>80,72</b>	<b>60,45</b>	<b>31,32</b>	<b>51,76</b>	<b>85,24</b>	<b>98,88</b>	<b>66,8</b>
	+10мин.в порош											<b>36,5</b>		<b>43,1</b>		<b>39,8</b>
t <sub>p</sub> 80%	Исходная	95,36	98,8	99,5		<b>97,89</b>	99,68	97,84	99,64		<b>99,053</b>	99,12	96,92	88,32	98,2	95,64
	После 15 минут	<b>94,64</b>	<b>99,44</b>	<b>98,32</b>	<b>99,4</b>	<b>97,95</b>	<b>97,96</b>	<b>90,52</b>	<b>91,56</b>	<b>97,16</b>	<b>94,3</b>	<b>99,2</b>	<b>95,44</b>	<b>96,24</b>	<b>99,16</b>	<b>97,51</b>
	+ 5 минут	<b>91,88</b>	<b>99,88</b>	<b>97,48</b>	<b>98,68</b>	<b>96,98</b>	<b>97,48</b>	<b>94,52</b>	<b>98,72</b>	<b>97,64</b>	<b>97,09</b>	<b>92,44</b>	<b>99,00</b>	<b>99,84</b>	<b>99,80</b>	<b>97,77</b>
	+10мин.в порош											<b>92,3</b>		<b>94,3</b>		<b>93,3</b>

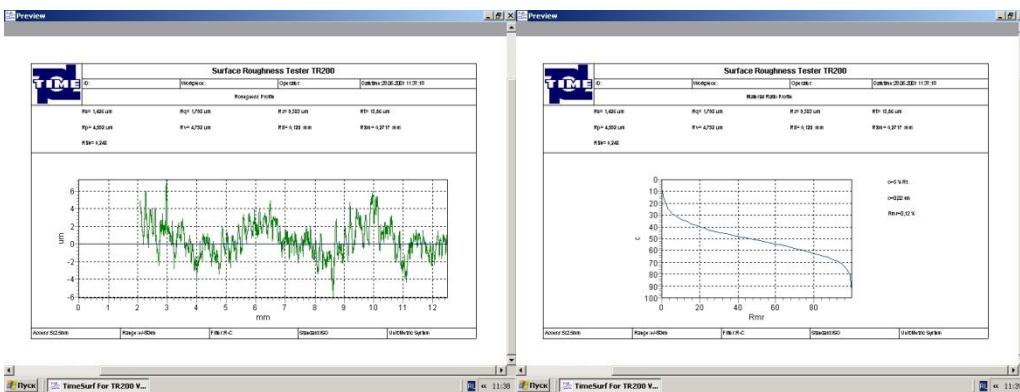
ПРИЛОЖЕНИЕ П5 ПРОФИЛОГРАММЫ ИСХОДНОГО КАЧЕСТВА ПС И ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ



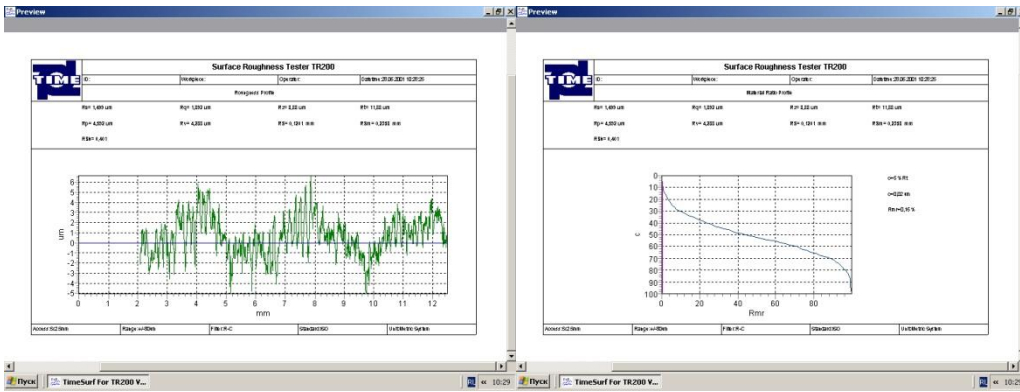
Исх



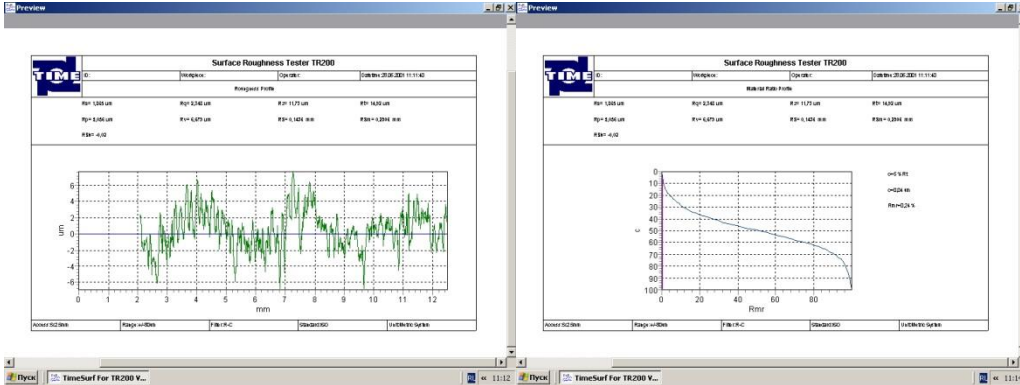
1-10мин



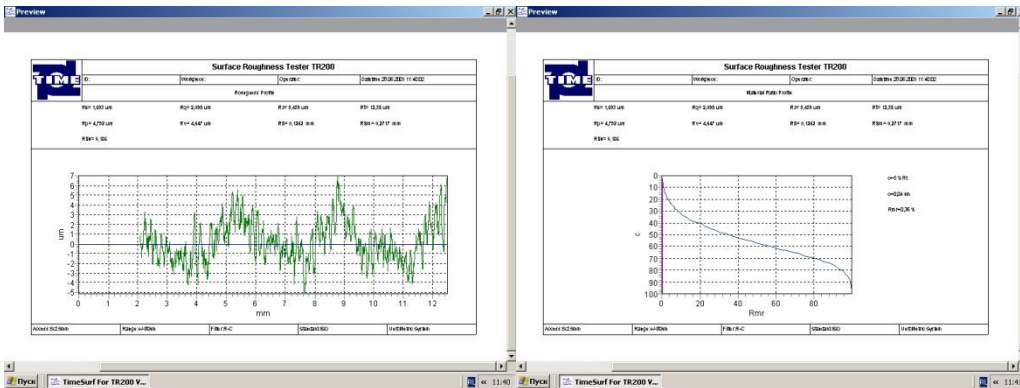
1-20мин



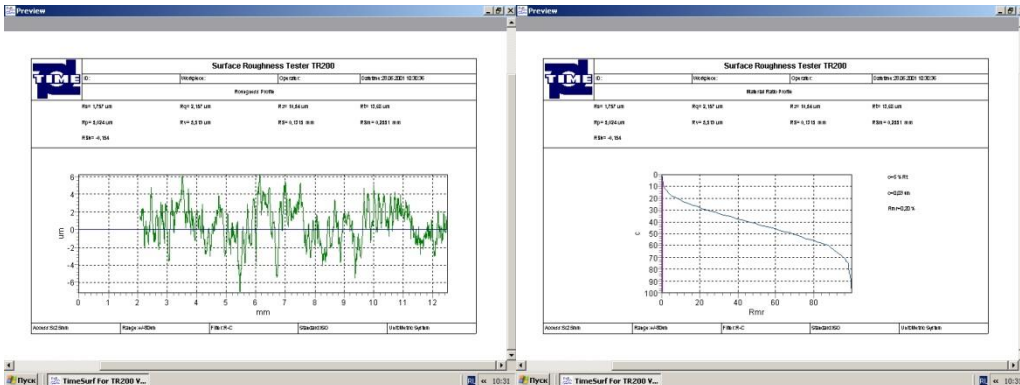
2исх



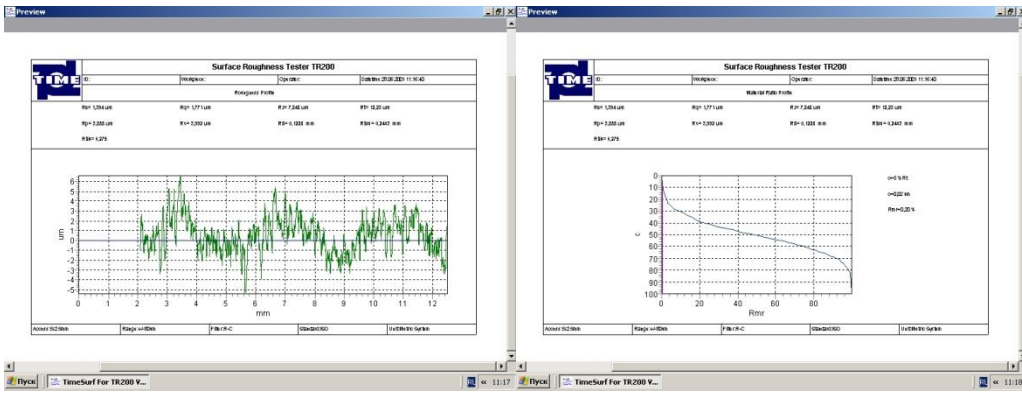
2-10мин



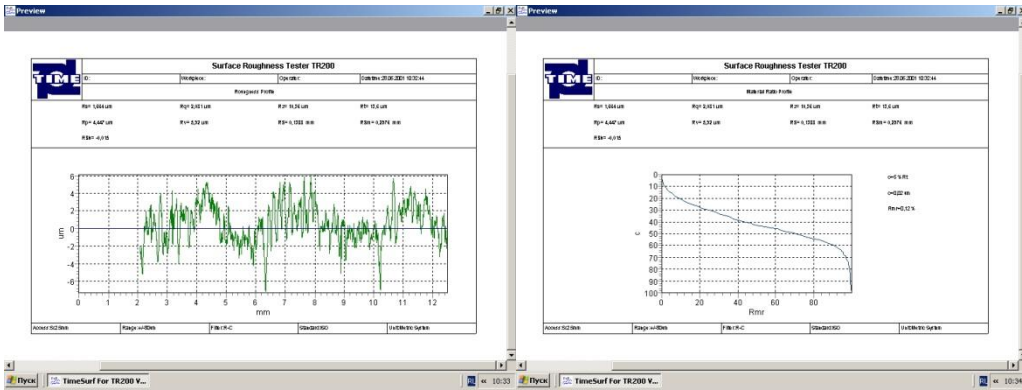
2-20мин



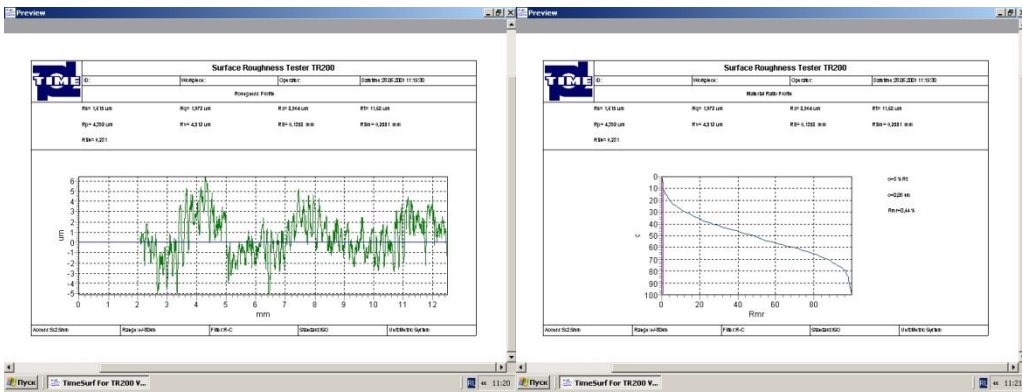
3исх



3-10 мин

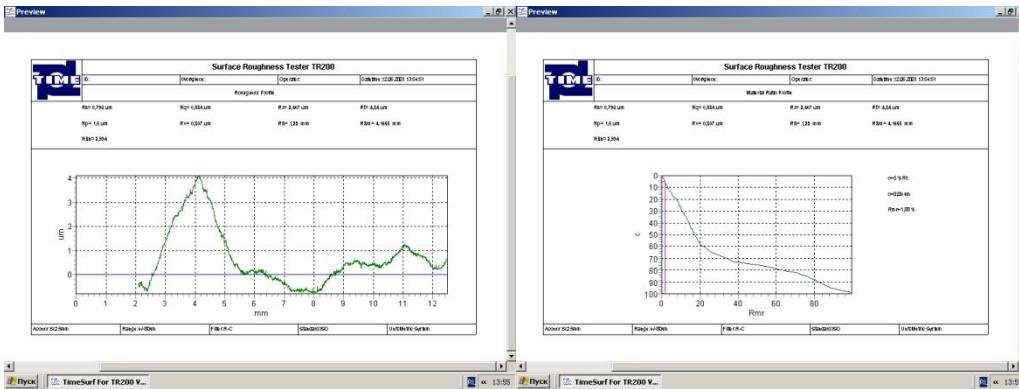


4исх

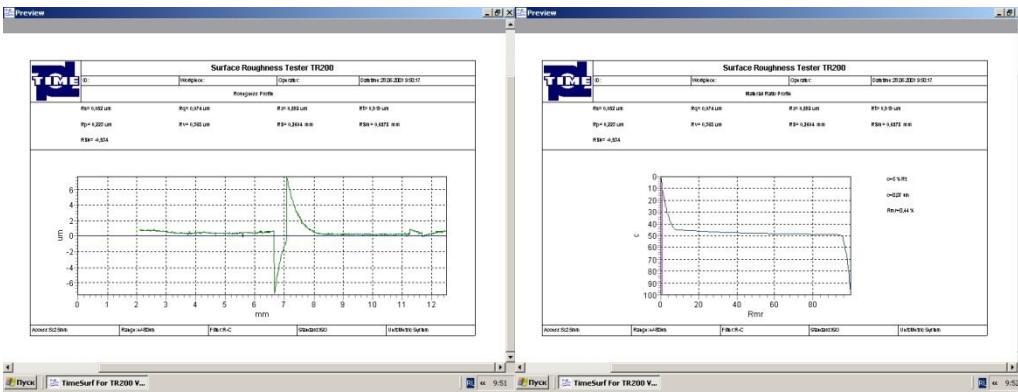
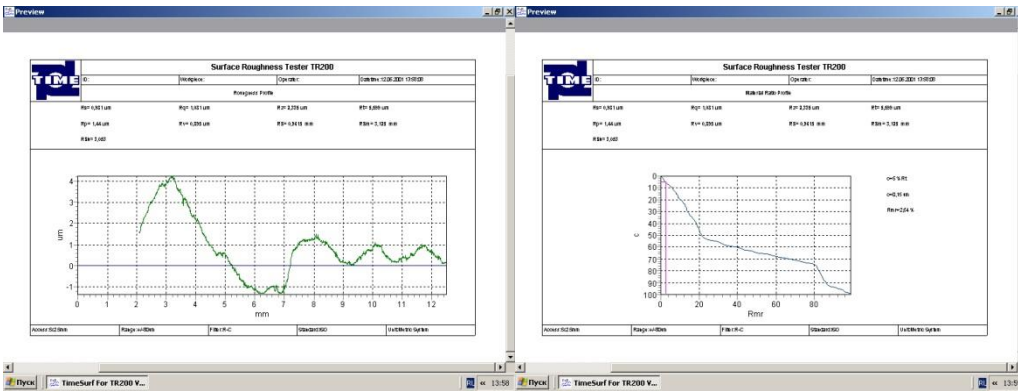
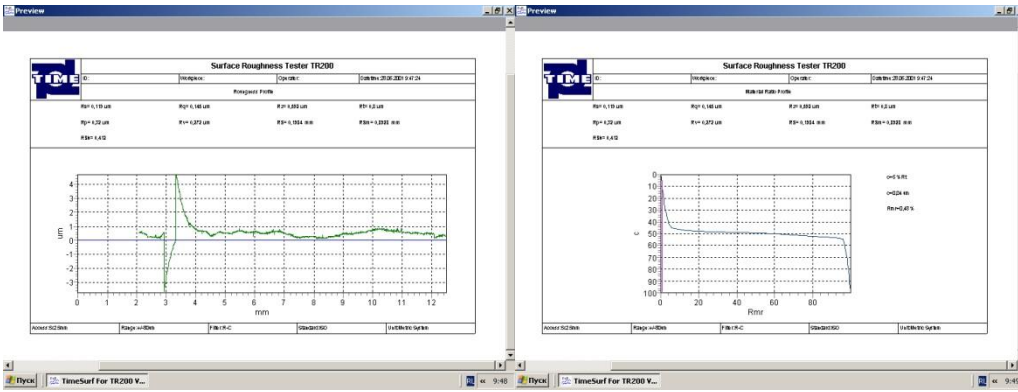


4-10 мин

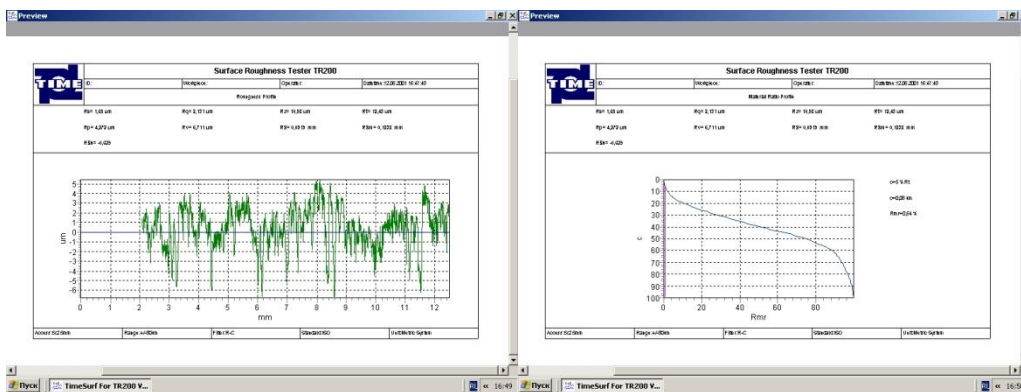
Полированная алюминиевая пластинка



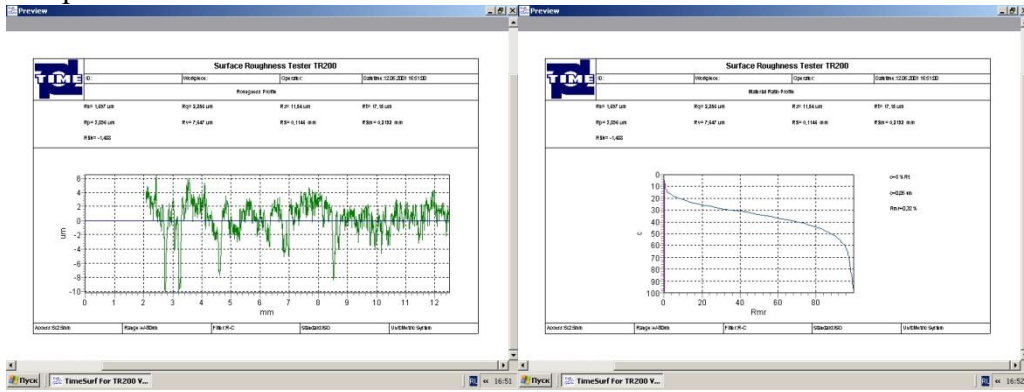
1 исх



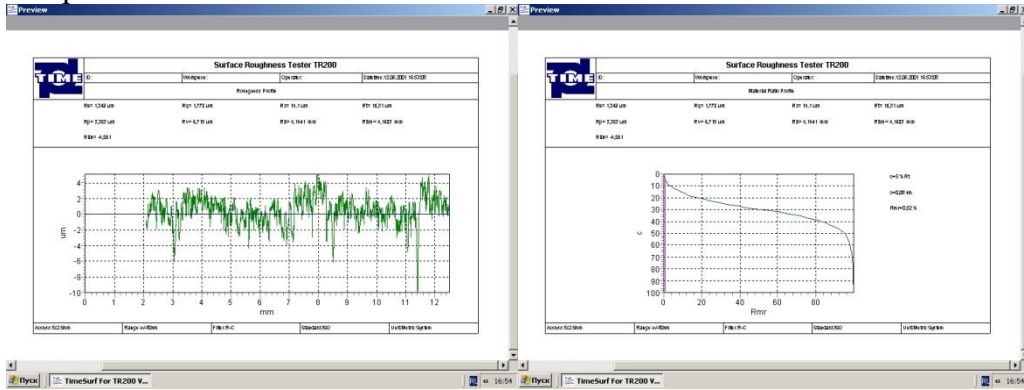
медь цилиндр 1.2 обработанная 15 минут



1 обр

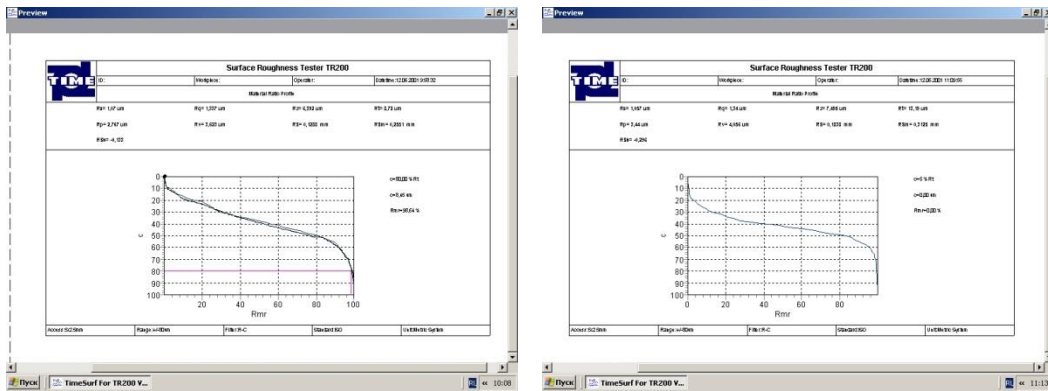


2 обр

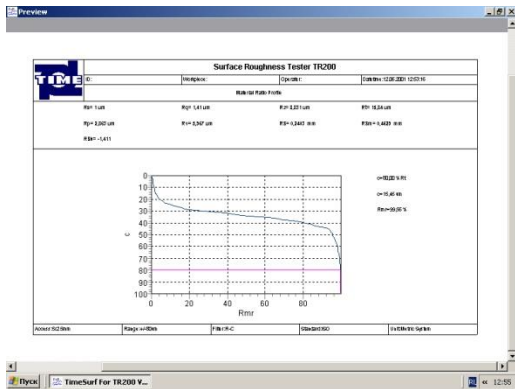


3 обра

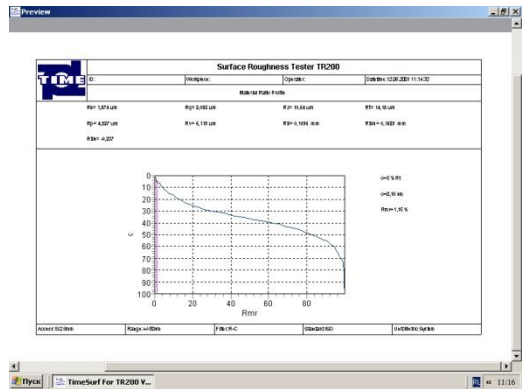
пластина 1.8



1

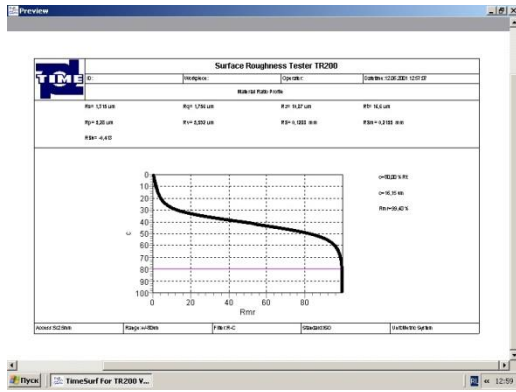
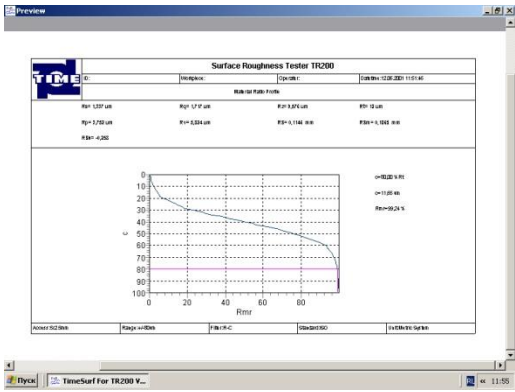


1-5

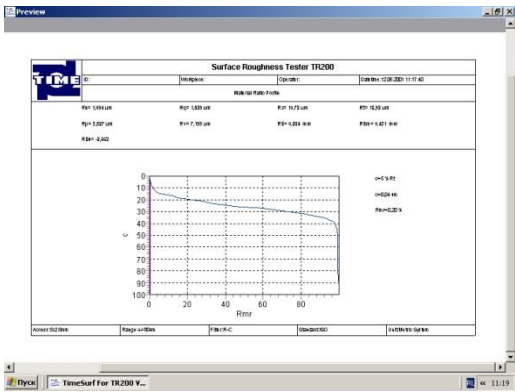


1-15

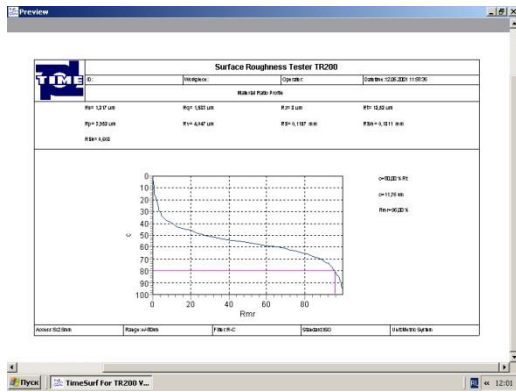
2-5



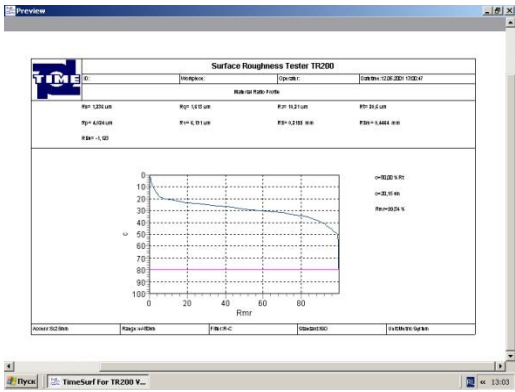
2-10



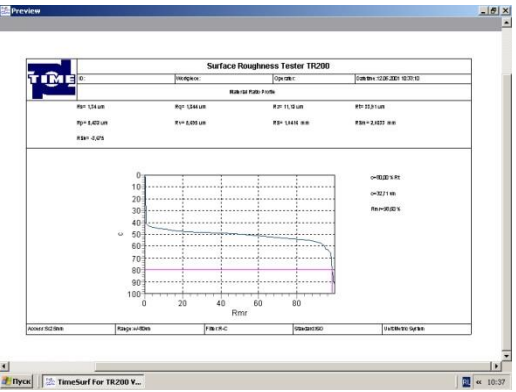
2-15



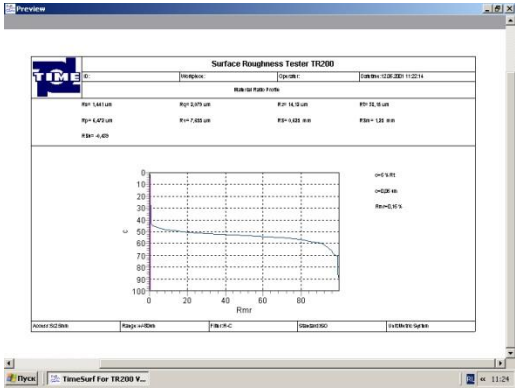
3-5



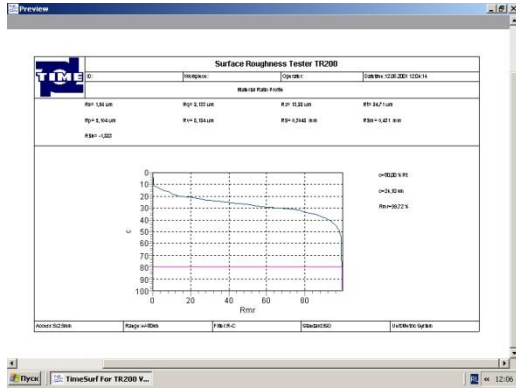
3-10



3-15



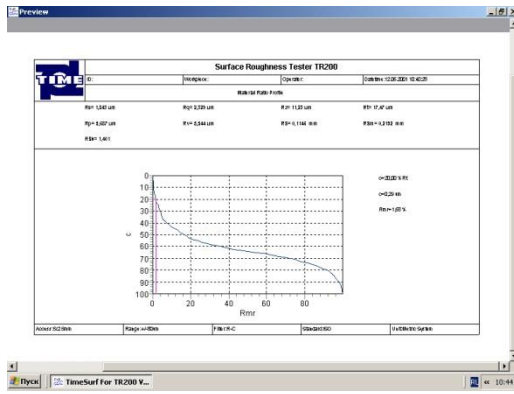
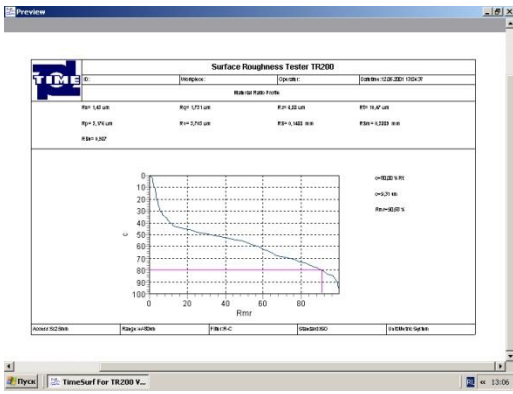
4



4-5мин

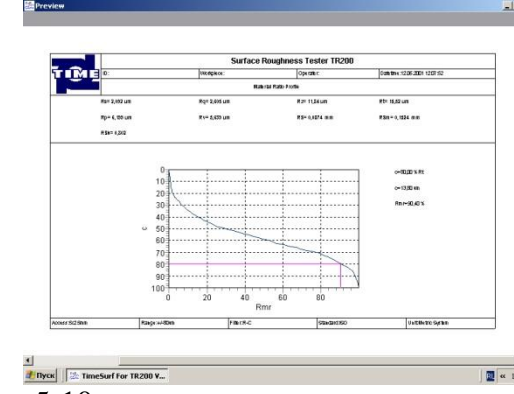
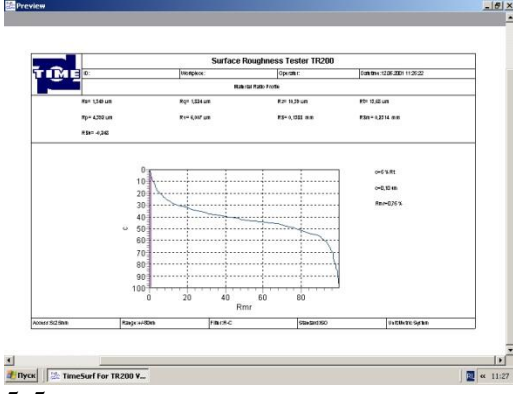
4-10





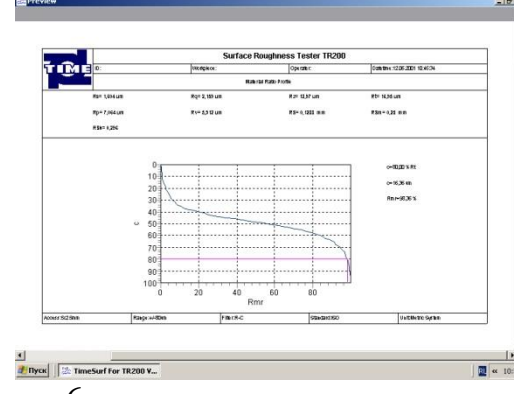
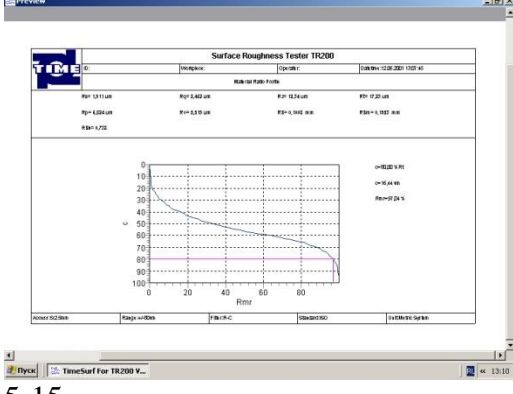
4-15

5



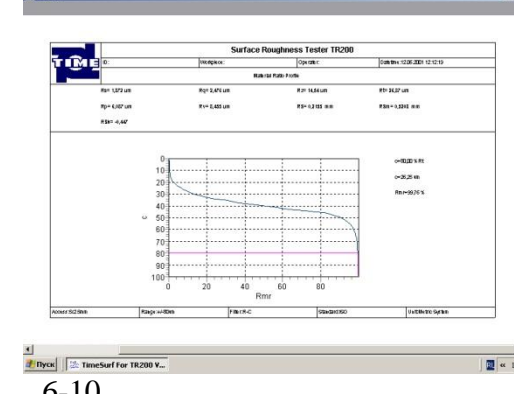
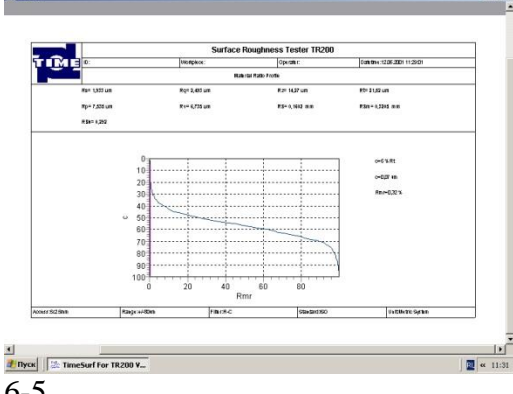
5-5

5-10



5-15

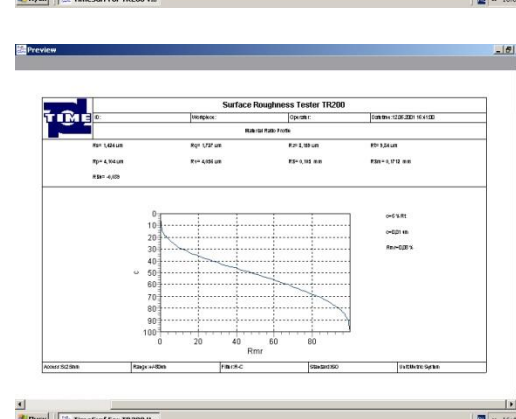
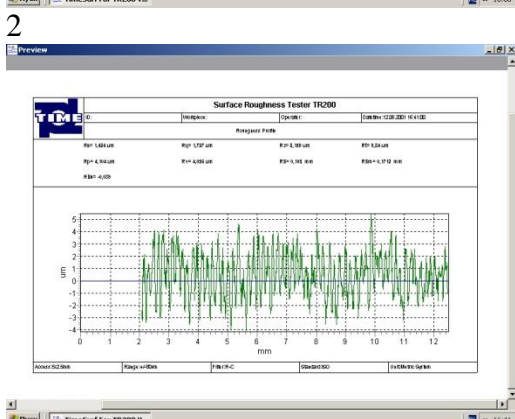
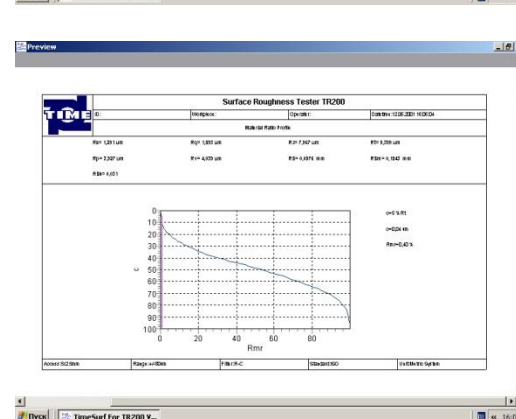
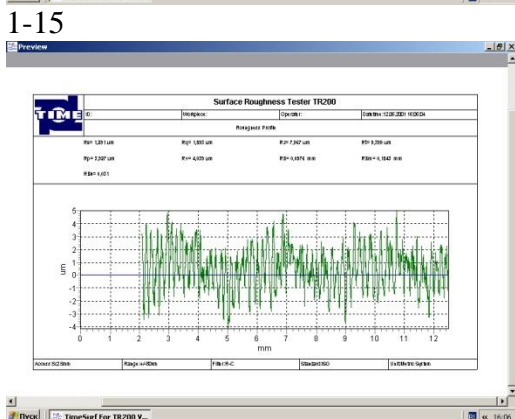
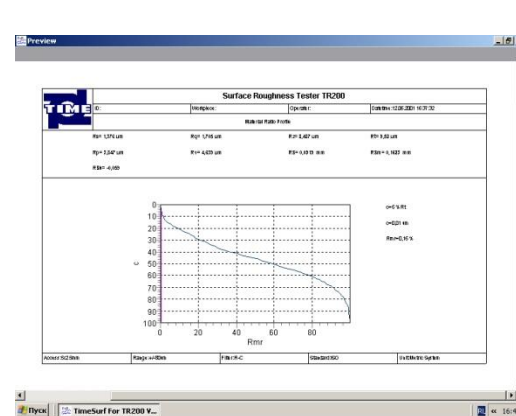
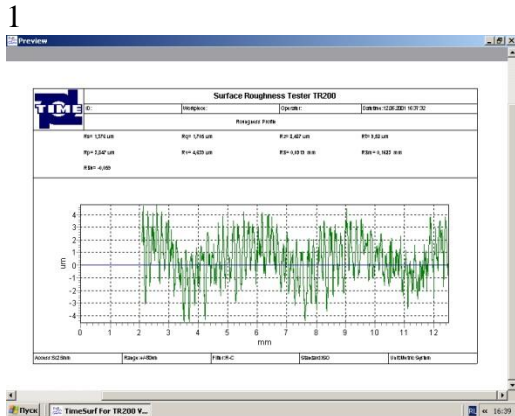
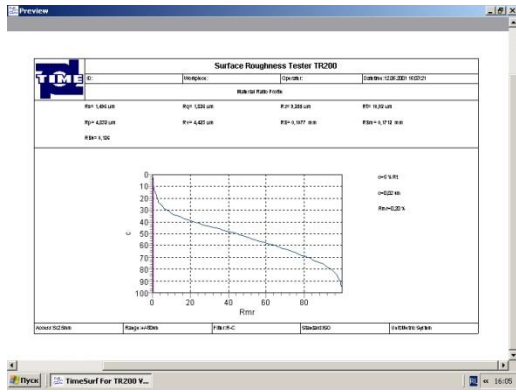
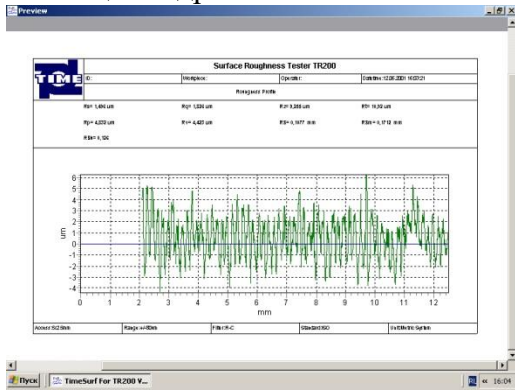
6



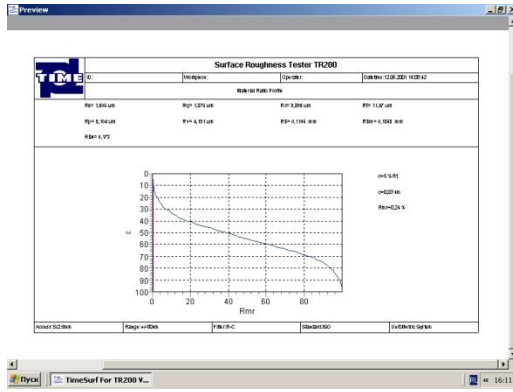
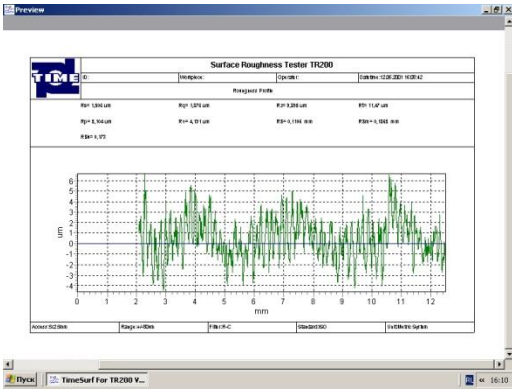
6-5

6-10

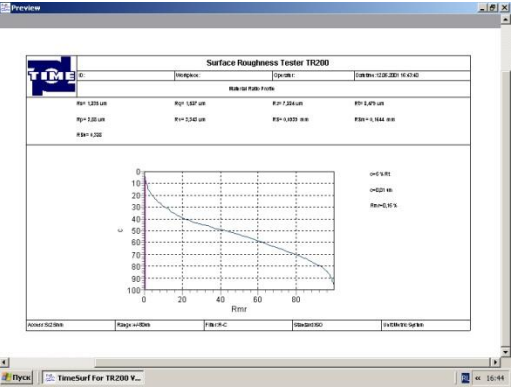
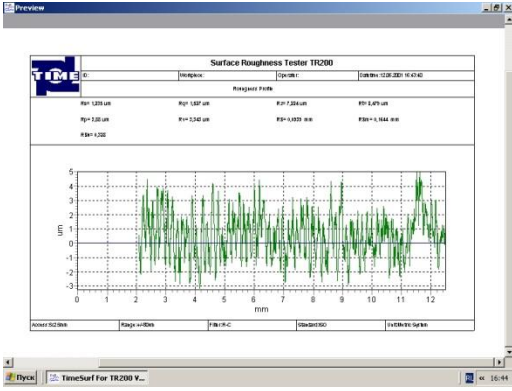
1.9 ал цилиндр 15 мин



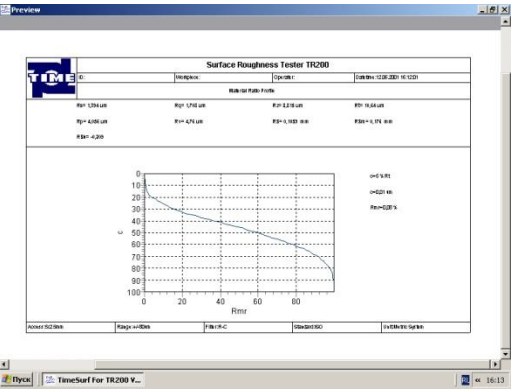
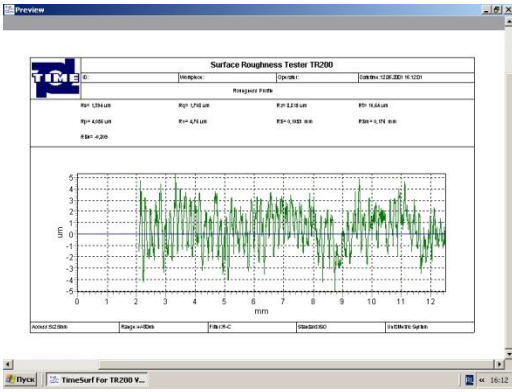
2-15



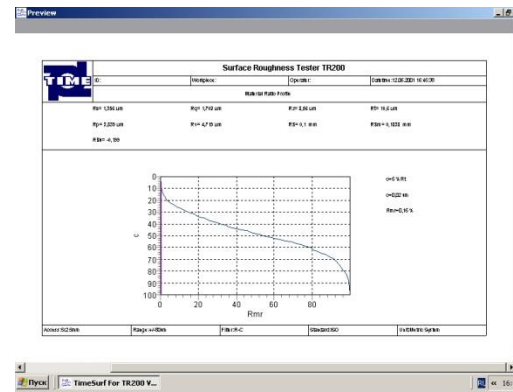
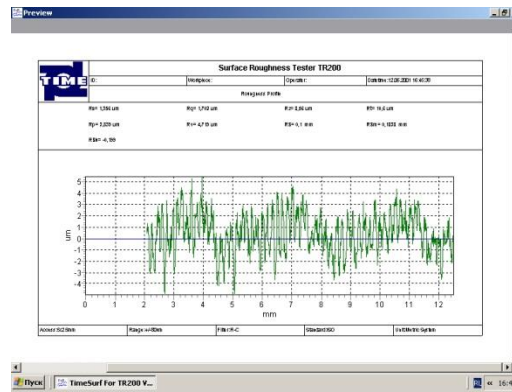
3



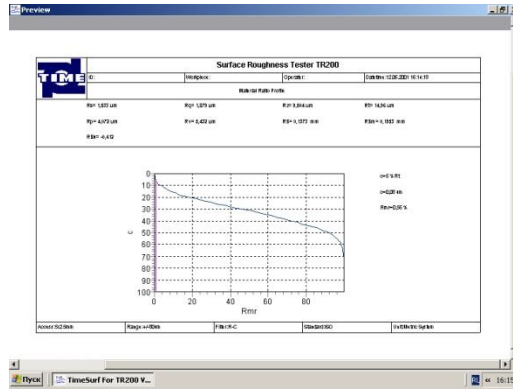
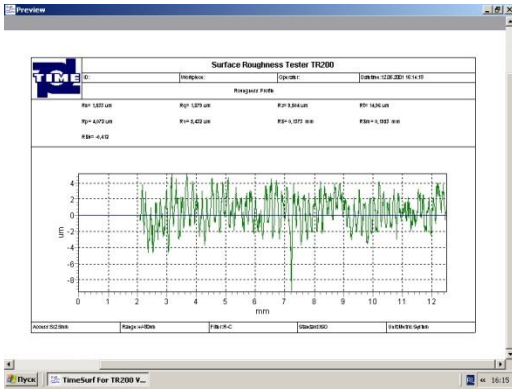
3-15



4

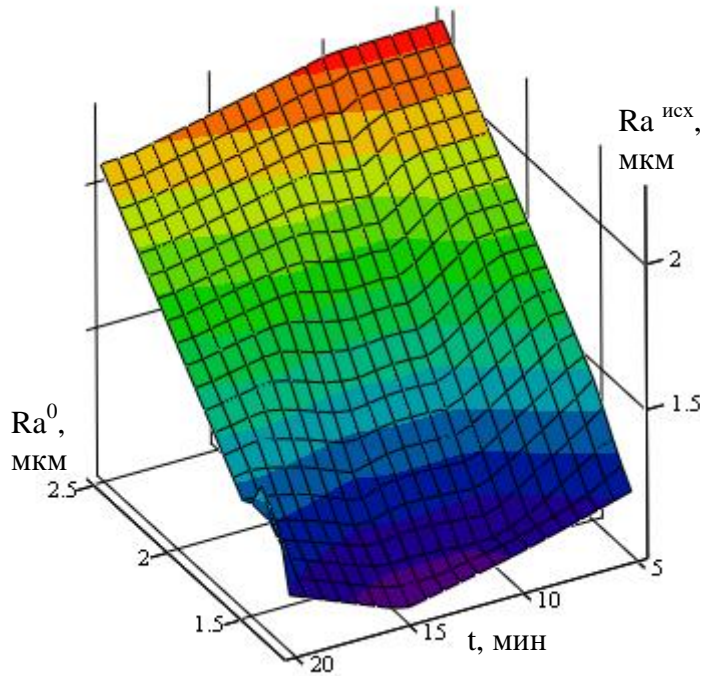


4-15

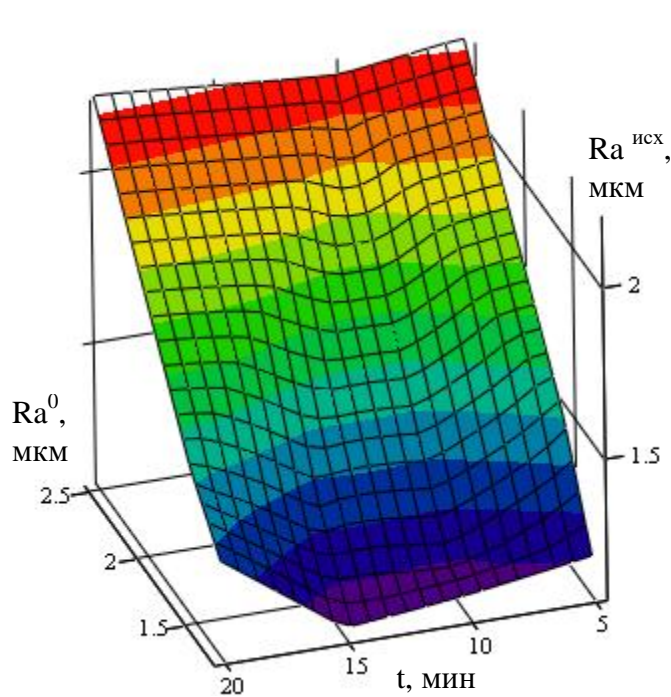


ПРИЛОЖЕНИЕ П6 ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ  
ЗАВИСИМОСТЕЙ В ВИДЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТКЛИКА

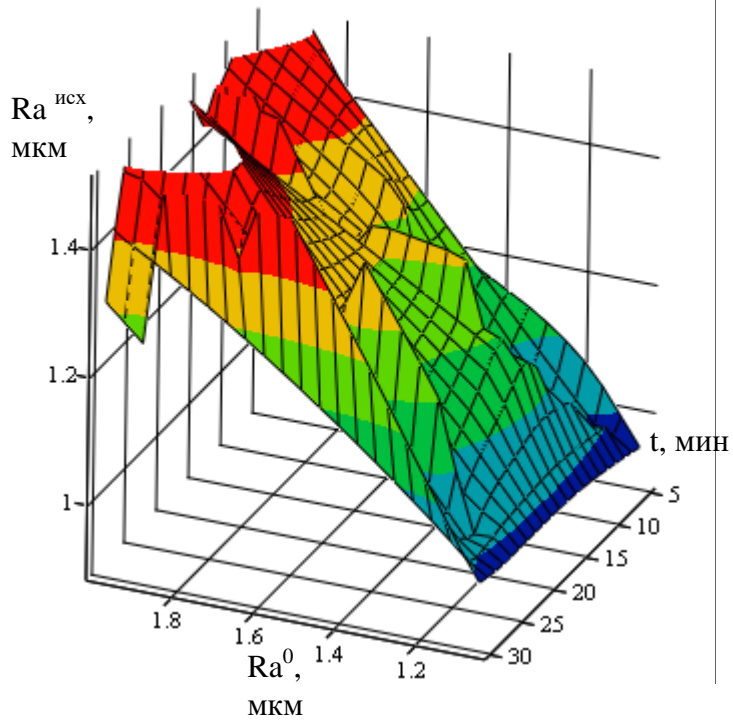
Экспериментальные данные для цилиндрического образца



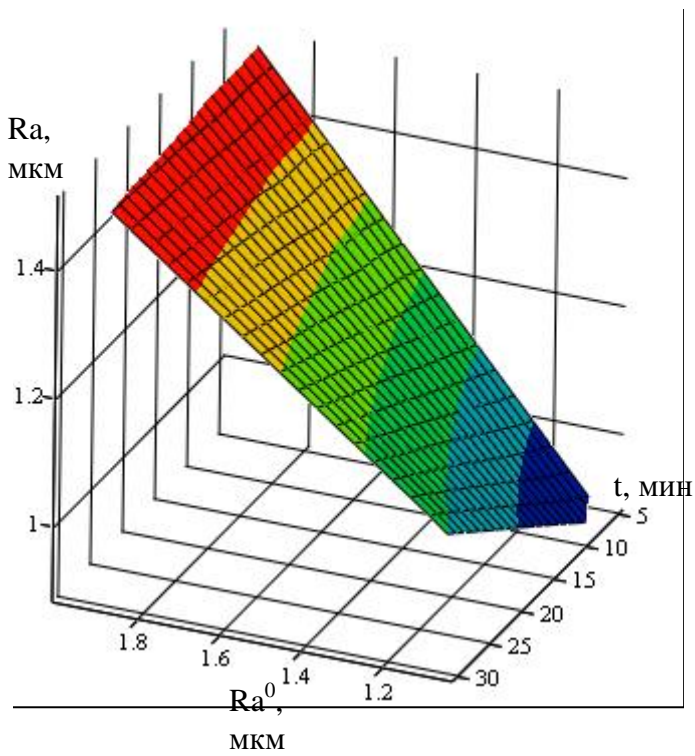
$$R_a = 1,255 * R_a^0 - 0,042 * t + 0,004 * t^2 - 0,038 * R_a^0 * t$$



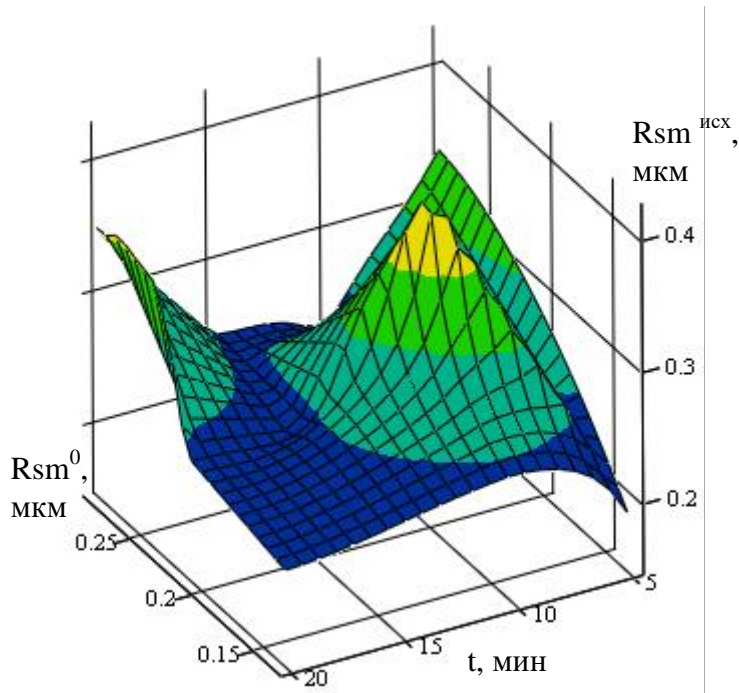
Реальные данные для пластины



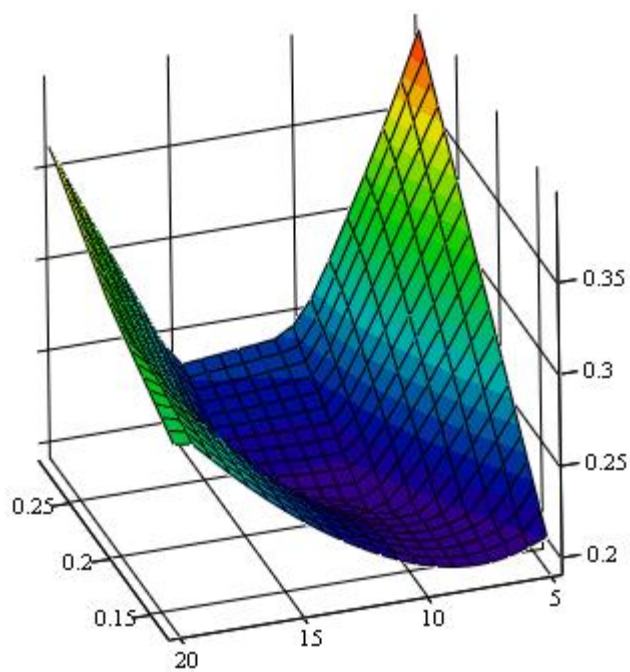
$$R_a = 0,776 * R_a^0 + 0,020 * t - 0,010 * R_a^0 * t$$



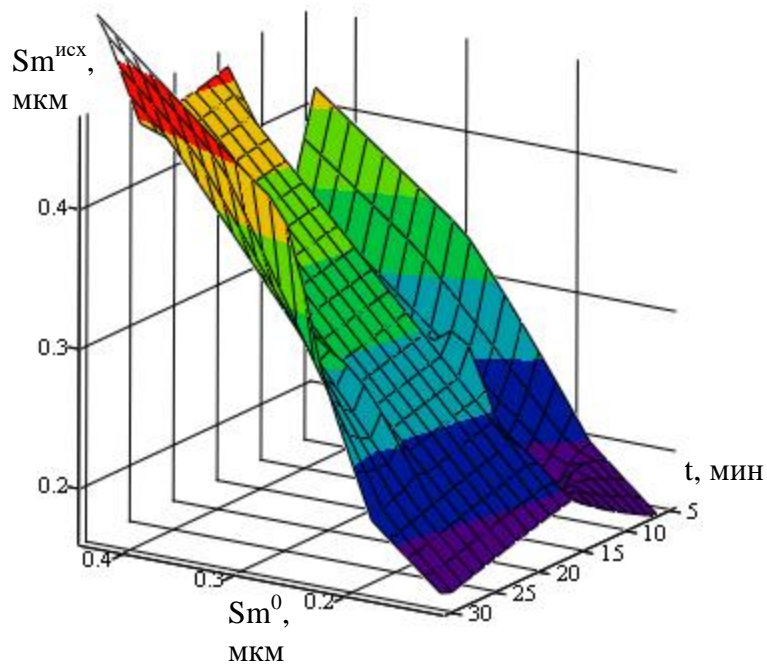
Реальные данные для цилиндрического образца



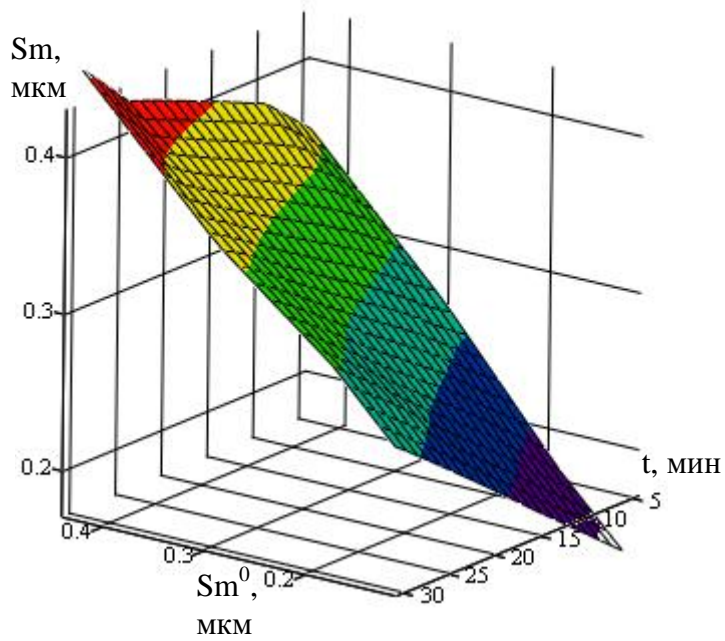
$$R_{sm} = 2,420 * R_{sm}^0 + 0,010 * t - 0,292 * R_{sm}^0 * t + 0,010 * R_{sm}^0 * t^2$$



Реальные данные для плавнины



$$S_m = 0,827 * S_m^0 + 0,007 * t - 0,009 * S_m^0 * t - 0,00004 * S_m^0 * t^2$$







**ООО «АВТОСЕРВИСНЫЙ ЦЕНТР «БЫТРАДИОТЕХНИКА»**

83023 г. Донецк, ул. Творческая, 27, ОКПО 25599618



Технический директор  
ООО «АСЦ «Быт радиотехника»»  
Берегнев С.В.

« 20 » 01 2016 г.

**АКТ**

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы:  
«Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин на основе акустической отделочно-упрочняющей обработки в квазиупругих средах» старшего преподавателя кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей» Донецкой академии автомобильного транспорта Матвиенко Сергея Анатольевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, начальник отдела эксплуатации Шестаков Д.А., ведущий инженер Рыбалко Г.В., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Матвиенко С.А. внедрены в деятельности ООО «АСЦ «Быт радиотехника»».

1. Вид внедрения: технология акустической отделочно-упрочняющей обработки деталей в квазиупругих средах и установка для её осуществления в ремонтном производстве.

2. Форма внедрения: подготовка запасных частей для ТО и ремонта подвижного состава

3. Эффект от внедрения: повышение срока служб пальцев подвески и пальцев кабины автомобилей DAF CF 85 и DAF TE 95, за счет повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей.

4. Ожидаемый экономический эффект - 148420 рублей в год (15 ремонтных комплектов пальцев).

Начальник отдела эксплуатации

Ведущий инженер

Шестаков Д.А.

Рыбалко Г.В.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор  
Донецкой академии  
автомобильного транспорта  
к.т.н., доцент  
И.П. Энглези



### АКТ

использования результатов кандидатской диссертационной работы  
соискателя С.А. Матвиенко в учебном процессе

В процессе подготовки диссертационной работы соискателем Матвиенко Сергеем Анатольевичем выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по проблеме повышения срока службы деталей пар трения машин. Результаты исследований опубликованы в отечественных и зарубежных журналах рекомендованных ВАК ДНР.

Результаты, полученные С.А. Матвиенко, используются в учебном процессе на факультете «АТ и ТТ» Донецкой академии автомобильного транспорта при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов» (используется в лекционных курсах и при выполнении лабораторных работ при реализации учебного процесса по дисциплинам «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов», «Основы технологии ремонта»).

Декан  
факультета «АТ и ТТ»

Н.Н. Ягодченко