

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
(наименование)

22.03.01. «Материаловедение и технологии материалов»
(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Современные материалы и технологии их производства»
(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Исследование микрорельефа поверхности, формируемой при
ультразвуковой упрочняющей обработке»

Студент

В.А. Макеев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент А.С. Селиванов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

к.п.н., доцент А.В. Кириллова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Аннотация

Выпускная квалификационная работа состоит из: 43 стр, 15 рис, 6 таб, 24 источников.

Исследование микрорельефа поверхности, формирование топографии в процессе механической обработки является актуальной темой в наше время.

Данное исследование направлено на изучение результатов шероховатости поверхности после различных классических обработок и с применением технологии ультразвукового упрочнения.

В связи с этим при выполнении исследований были решены следующие основные задачи:

1. Проведен анализа научной литературы по существующим методам упрочнения поверхностей.
2. Изучено применение методики ультразвукового поверхностного упрочнения.
3. Отражены особенности формирования шероховатости на поверхности образцов, также особенностей её топографии.
4. Анализированы и сравнены между собой различные обработки выглаживанием с применением ультразвуковых колебаний и без.

В начале работы, был сделан анализ уже существующих методов обработки поверхностей классическими способ

Abstract

The title of the graduation work is Study of surface topography formed during ultrasonic hardening treatment.

The senior thesis consists of an introduction, four parts, a conclusion, tables, the list of references, including foreign sources.

The key issue of the thesis is the study of the surface of various materials as a result of different methods of surface treatment. In this paper, we address the problem of obtaining a given surface quality depending on the parameters of ultrasonic smoothing.

The purpose of the work is: to analyze the known processing methods for strengthening the surface layer, to review the dependence of the roughness parameters on the performance characteristics of machine parts. An experiment to study the effect of various input parameters of ultrasonic treatment on the roughness and topography of the surface.

The thesis can be divided into the following logically interrelated parts: analysis of existing methods of processing machine parts; description of the UNSM method in our experiment, the methodology of experimental research.

In conclusion we would like to stress that the technique of ultrasonic smoothing of surfaces has a great potential for development not only in the automotive industry.

Содержание

Введение.....	5
Глава 1 Обзор ультразвуковой упрочняющей обработки.....	7
1.1 Описание известных методов ППД	7
1.2 Обзор ультразвукового метода ППД.....	10
1.3 Влияние УЗО на показатель шероховатости поверхностного слоя	13
1.4 Методы количественной и качественной оценки поверхностей деталей машин после механической сборки	16
1.4.1 Анализ параметров, характеризующих состояние поверхности	17
1.4.2 Влияние существующих способов токарной обработки на эксплуатационные характеристики	20
1.4.3 Методы количественной оценки топографии поверхностей с помощью аппарата фрактальной геометрии	23
Глава 2 Методика экспериментальных исследований	27
2.1 Оборудование, инструмент и оснастка.....	27
2.2 Образцы для исследований и режимы обработки	29
Глава 3 Результаты экспериментальных исследований формирования шероховатости	32
Список используемых источников.....	41

Введение

На сегодняшний день от свойств поверхности деталей и узлов зависит безопасность их работы и эксплуатационные характеристики, так как в процессе использования они контактируют между собой или окружающей средой. В связи с общей тенденцией усовершенствования и усложнения узлов и деталей практически во всех отраслях жизнедеятельности человека возникает необходимость повышать качество их поверхностного слоя, который больше всего подвержен износу и воздействию агрессивной окружающей среды. Поэтому на сегодняшний день любые детали, подверженные повышенным нагрузкам требуют более высоких стандартов при производстве, так как на поверхности создаются напряженные состояния, в результате которых, в дальнейшем, образуются трещины и как следствие – их разрушение. Если рассматривать в целом эксплуатацию механизмов, то в процессе его работы он контактирует с другими деталями или взаимодействует с окружающей средой [1]. Сопротивление коррозии, сопротивление контактной усталости, сопротивление длительному износу, величина шероховатости – это важные характеристики поверхностного слоя, а взаимосвязь этих параметров говорит о необходимости изготавливать достаточно твёрдые детали, имеющие сжимающие упругие напряжения, гладкий поверхностный слой с минимальным количеством микронеровностей и мелкодисперсной структурой. Довольно популярными доработки деталей по сегодняшний день остаются такие классические способы как: доводка, шлифование и хонингование, однако использование вышеописанных методов в качестве финишной операции не всегда позволяет достичь заданных характеристик поверхности за счёт особенностей технологии.

Среди методов, упрочняющих поверхностный слой, существуют способы с применением ультразвуковых колебаний, такие как вибрационное

накатывание и выглаживание. С помощью высокочастотных импульсов деформирующего элемента получается достигать высоких характеристик поверхности за счёт «сдавливания» вершин неровностей во впадины, если рассматривать с процесс с точки зрения профиля поверхности. Также можно отметить, что в процессе деформации поверхности происходят множественные сдвиги в кристаллической решётке, что приводят к сжимающим остаточным напряжениям, благоприятно влияющим на твёрдость образца. Особенностью метода является захват не всей поверхности образца, а лишь только нескольких миллиметров. В ходе обработки деформирующий элемент образует небольшую область деформации, которая перемещается по образцу со скоростью продольной подачи. Достоинствами УЗО является относительная простота реализации, на различного рода производствах, а также небольшая стоимость внедрения необходимого оснащения для использования данного метода выглаживания на станках токарной группы. Как следствие – с помощью вложений с использованием этой технологии выглаживания с применением ультразвуковых технологий можно добиться увеличения сроков эксплуатации и качества деталей и узлов за счёт увеличения стойкости к коррозии, усталости, увеличением твёрдости образцов и т.п. Применение метода ультразвуковой обработки позволяет получить поверхность отличную по характеристикам от традиционных методов обработки, с высокими антифрикционными свойствами. [2]

Глава 1 Обзор ультразвуковой упрочняющей обработки

1.1 Описание известных методов ППД

Долговечность и безопасная работа деталей машин сильно связана с правильностью форм и качеством шероховатости, а также в целом характеристиками поверхностного слоя.

В ходе эксплуатации тех или иных механизмов возникает выработка, изменение геометрии, снижаются гидрофобные свойства, возникает изменение расположения деталей относительно друг друга, что влечёт за собой потери в КПД механизма и потенциальный риск в их дальнейшей бесперебойной работе. Износ поверхностного слоя напрямую зависит от условий эксплуатации [6]: температурный режим, применяемые смазочные материалы, статические или ударные режимы работы - влияние этих факторов в первую очередь влияет на поверхность, поэтому необходимо изготавливать узлы и агрегаты отвечающие всем современным требованиям на сегодняшний день. [1,3]

В процессе эксплуатации поверхности машин разделяют три стадии:

1) Стадия при которой поверхность проходит процесс «прирабатывания», при которой упругие деформации переходят в пластические.

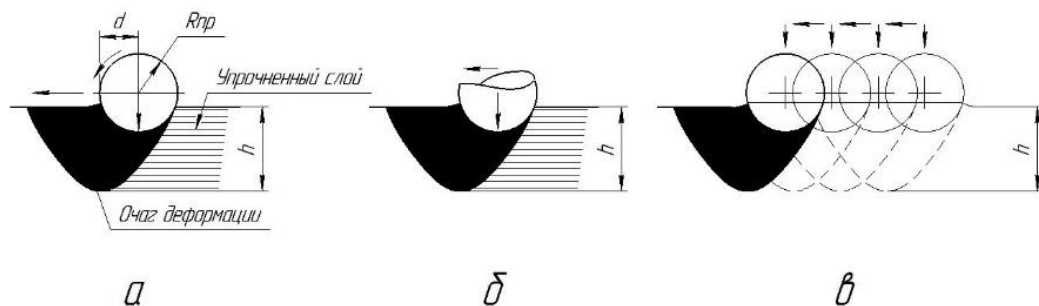
2) Эксплуатационный период при котором заложена основная надёжность детали.

3) Предельное изнашивание – период при котором происходит финальный износ перед самым выходом из строя.

Для обеспечения оптимальной работы поверхности она должна состоять из мелкодисперсной структуры, иметь большую площадь соприкосновения за счёт правильности геометрических форм, а также иметь остаточные сжимающие напряжения.

При современных уровнях развития существуют множество методов по упрочнению деталей, среди которых весьма удачными считаются методы пластического деформирования. С помощью методов ППД получается добиться приближения квалитетов шероховатости к максимальным, увеличить твёрдость образцов на 10-25% в зависимости от параметров упрочнения и исходного материала, создать остаточные внутренние напряжения и регулярный микрорельеф. [4]

Сущность метода ППД основывается на статическом давлении рабочего инструмента на поверхность образца относительно её вращения. При этом, в роли деформирующего элемента могут выступать различные тела сферической формы, которые участвуют непосредственно в возникновении пластического деформирования на поверхности заготовки. (Рисунок 1)



а – прокат, б – скольжение, в – вдавливание

Рисунок 1 – Воздействие деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность

Опираясь на ГОСТ 18296–72 были составлены основные методы обработки поверхностным пластическим деформированием, составленные Всесоюзным научно-исследовательским институтом по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ) (Рисунок 2)



Рисунок 2 – основные методы поверхностного пластического деформирования

Для статических методов характерна равномерная и непрерывная сила давления на обрабатываемый элемент, зона деформирования с равномерной скоростью перемещается продольно заготовки, выглаживая её. Примером такой обработки можно назвать выглаживание. [3]

.Динамические методы обработки поверхностей подразумевают обработку поверхности при которой деформирующий элемент выполняет работу при непостоянной нагрузке с ударными поступательными движениями, которые можно описать синусоидой. Примером такого метода обработки может служить чеканка роликами или шариками. [5, 10]

Совокупность двух методов обработки можно назвать комбинированным способом, так как он включает в себя особенности обработки как статических, так и динамических методов. Ярким примером такой обработки можно назвать ультразвуковую обработку выглаживанием [21, 22].

1.2 Обзор ультразвукового метода ПДД

Первым, кто предложил совместить энергию ультразвуковых колебаний и классический способ статического выглаживания был И.И. Муханов ещё в 1964 году. Особенность этого метода, в отличие от статического, заключается в колебаниях, которые протекают в месте соприкосновения деформирующего элемента с образцом. От генератора ультразвуковых частот передаются колебания по типу синусоиды, в результате чего на поверхности образуются следы от внедрения деформирующего элемента, где a – глубина внедрения деформирующего элемента, S – шаг удара инструмента (Рисунок 4). На рисунке 3 схематично изображено положение деформирующего элемента по отношению к обрабатываемой поверхности. В качестве отделочной головки могут выступать различные твёрдосплавные материалы, а также головки с алмазным напылением, различной формы и радиуса. [23]

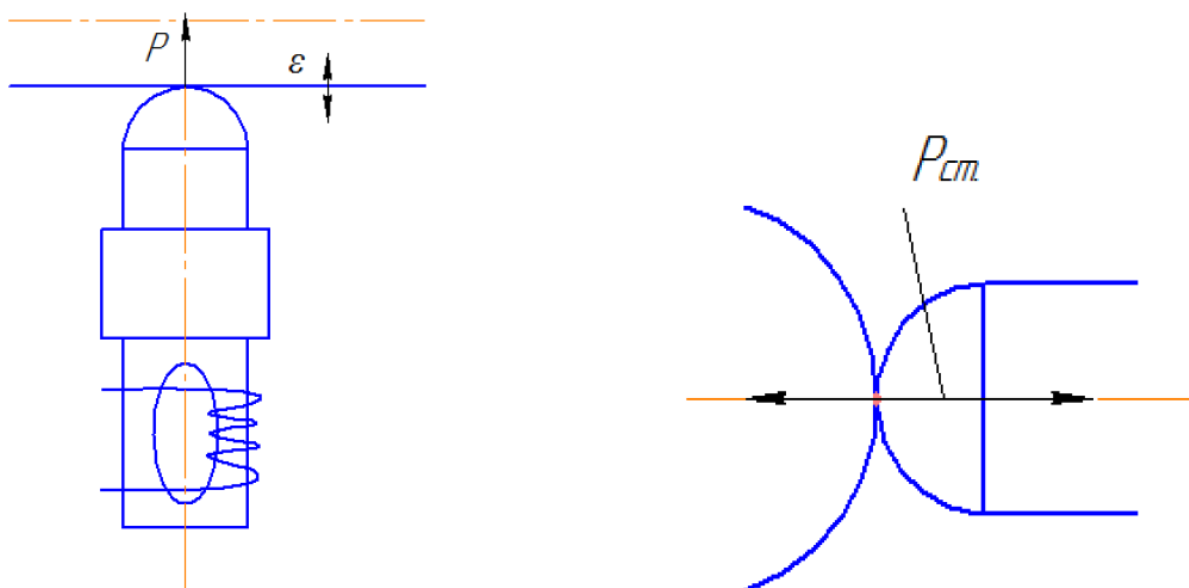


Рисунок 3 – Расположение отделочной головки относительно образца

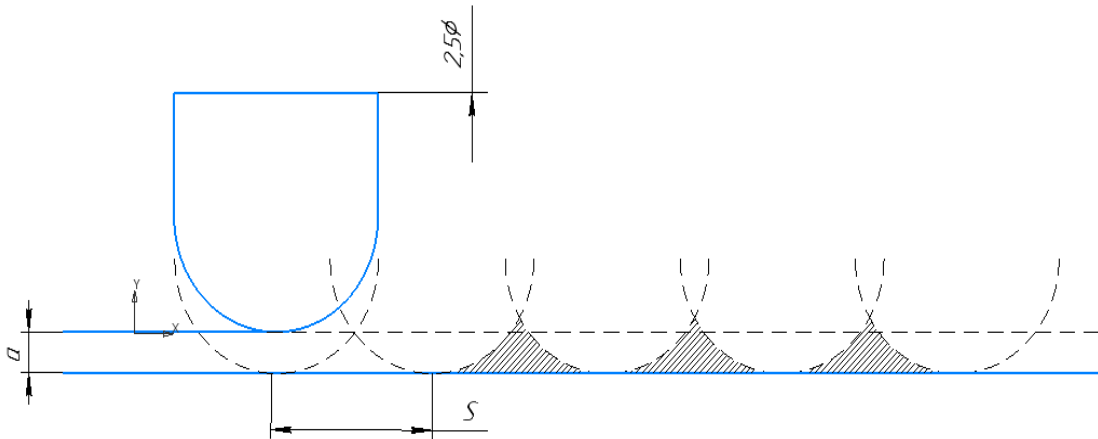


Рисунок 4 – кинематика вдавливания отделочной головкой при ультразвуковом выглаживании

Операцию ультразвукового выглаживания необходимо рассматривать в качестве финишной обработки непосредственно перед началом эксплуатации той или иной детали. За счёт свойств поверхностного слоя после применения УЗО её можно применять вместо абразивной обработки. [8]

В результате УЗО, в зависимости от параметров обработки, можно наблюдать с разной степенью величины различия поверхности образца от первоначальной

- в ряде случаев, в отличие от классических способов можно наблюдать более производительное повышение качества шероховатости, за счёт чего в производственных мощностях можно сократить количество времени затраченное на финальную обработку образца [18]

- после применения внедрения ультразвуковых колебаний в статический способ выглаживания поверхность отличается от исходной правильностью геометрических форм, за счёт этого можно наблюдать большую площадь контакта при монтаже детали в механизм [9]

- за счёт физико-механических явлений, протекающих в месте контакта деформирующего элемента с поверхностью детали происходит образования регулярного микрорельефа [9], формируются остаточные сжимающие напряжения, что в перспективе напрямую положительно влияет на эксплуатацию механизма в тяжёлых условиях.

Термин «алмазное выглаживание» означает что в качестве инструментального материала используется натуральный алмаз. Известно, что данный вид материала обладает значительной твердостью что позволяет обработать большинство конструкционных материалов. Также можно отметить, что использование натурального алмаза на практике в производстве сопряжено с определенными трудностями. Например, перед тем как использовать алмаз требуется его ориентировка в направлении максимальной твердости. Кроме того, натуральный алмаз обладает значительной хрупкостью, соответственно обработка поверхностей, имеющих большие биения относительно оси вращения не представляется возможной и т.д. [5] Для обработки выглаживанием в качестве инструментальных материалов широко применяются следующие [24]:

- алмаз
- специальные материалы для отделочных головок ВК6, ВК8
- другие альтернативные сплавы с высокими характеристиками

Все вышеописанные материалы устанавливаются и передают свою энергию с торца концентратора и устанавливаются путём ввинчивания с помощью резьбы (Рисунок 5)

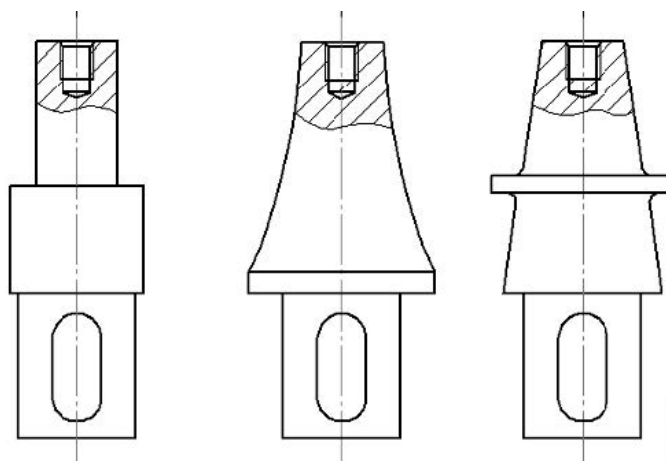


Рисунок 5 – устройство концентраторов для ввода ультразвука

1.3 Влияние УЗО на показатель шероховатости поверхностного слоя

Способ ультразвукового упрочнения, рассматриваемый в данной работе, нашёл применение только для обработки металлических поверхностей, так как у других материалов твёрдость не позволяет добиваться похожих результатов упрочнения поверхности. Для того, чтобы возникли необходимые деформации в процессе обработки, статическую обработку материала совмещают с ультразвуковыми колебаниями от 15000 до 30000 ударов в секунду. Весь процесс происходит между деформирующим элементом и поверхностью детали. Варьируемую частоту ударов деформирующего элемента производит ультразвуковой преобразователь, установленный на станке ЧПУ. Для обеспечения необходимой статической силы между деформирующим элементом и обрабатываемой поверхностью практикуют использование регулируемой пружины или гидравлической установки.

Рассматривая обработку методом статического давления на поверхность без использования колебаний ультразвука необходимо отметить, что этот способ так же применяется в целях повышения качественных характеристик поверхности, однако с меньшим эффектом. В процессе его применения деформирующий элемент перемещается по поверхности материала нанося под собой регулярную силу сжатия, а также оставляя сжимающие напряжения и

изменённую микроструктуру. [25] На основании исследовательских работ Radregus при помощи сферических полирующей деформирующей элементов при необходимых параметрах можно добиться повышения физических и механических свойств. Можно отметить, что в многим учёным доводилось проводить эксперименты по влиянию статического глубокого выглаживания при различных исходных параметрах с использованием сферических элементов, в некоторых из них

Согласно Rodriguez [20] и др., полирующая сфера улучшает как физические, так и механические свойства вращающихся деталей. Многие исследователи в прошлом исследовали влияние глубокого выглаживания сферой с использованием различных параметров для отделки вращающихся частей, но есть несколько исследований, которые исследуют его влияние на овальность или конечный диаметр.

Способ ультразвукового пластического деформирования подразумевает обработку материала без образования стружки в процессе упрочнения, так как в ходе обработки материал, наоборот, «вдавливается» внутрь неровностей поверхности и имеет большое значение на формирование регулярного микрорельефа и шероховатости.

Ультразвуковая энергия, преобразованная от преобразователя, передаётся через отделочную головку на поверхность образца. Здесь можно наблюдать сущность явления ультразвукового пластического деформирования, если рассматривать его со стороны профиля поверхности образца.

Так как операция приведённая в данном исследовании не является промежуточным этапом в формировании поверхностного слоя, логично её применять в качестве финишного альтернативного способа достижения заданной чистоты поверхности. Так как пропадает необходимость в проведении трудоёмких финишных работ (например, шлифовка или ручка полировки) возможно применить освободившееся время в нужном

направлении для производства. В то время как технологический процесс за счёт исключения некоторых процессов сокращается, а значит применение этого способа может найти экономическую выгоду на производственных мощностях.

Применение этого метода позволяет обрабатывать различные детали разной длины. За счёт своей продуктивности можно обрабатывать приводные валы, карданы, шейки коленвалов, а также зубчатые шестерёнки и другие детали.

Метод ультразвукового пластического деформирования был предложен довольно давно, однако исследований на влияние этого метода на правильность геометрических форм после обработки как таковых проведено не было. Многие авторы изучали этот метод как усовершенствованную статическую обработку, но изучения неовальности после УЗО приведено не было

Так как нынешние стандарты качества с каждым разом становятся все выше и выше, производители требуют все большие стандарты качества от поставщиков. В случаях постоянного сотрудничества, а также сверки поставляемой продукции от стандартов качества производитель может быть не удовлетворён качеством продукции, что в перспективе может повлечь сильные экономические потери при больших объёмах поставляемой продукции.

В автомобилестроении чрезвычайно многих узлов и агрегатов работают в режиме контакта друг с другом, а значит немаловажной характеристикой влияния на дальнейшую эксплуатацию будет шероховатость поверхности. К сожалению, при всём желании на сегодняшний день добиться безупречных качеств шероховатости не предоставляется возможным, рассматривая профиль поверхности образца при любой современной обработке она будет иметь микронеровности.

1.4 Методы количественной и качественной оценки поверхностей деталей машин после механической сборки

Поскольку ультразвуковая упрочняющая обработка подразумевает выглаживание цилиндрических поверхностей, основным фактором является корректная черновая обработка без повторного монтажа для УЗО, так как в процессе проверки заказчиком важную роль играет овальность готовой продукции. Как правильно, допустимые отклонения от установленных норм регламентирует заказчик. Допуск – это величина отклонения размеров образца без нарушения эксплуатационных свойств детали в работе. Правильность геометрической формы является немаловажным параметром при производстве. В ходе разработки технологического процесса необходимо учитывать затраты на достижение необходимого качества поверхности и выходную продукцию чтобы найти правильный баланс между ними.

В настоящее время при производстве очень распространены различных округлые узлы и агрегаты, которым необходимо уделять особое внимание правильности геометрической формы так как это напрямую влияет на дальнейшую безопасную эксплуатацию и надёжность узла в целом. В случае отклонения от заданного допуска в перспективе может повлечь за собой большие убытки на производстве за счёт множественных претензий со стороны потребителя готовой продукции.

Для обеспечения необходимого контроля на производстве применяют различные формы выборочного контроля готовой продукции. Выборочный контроль – это чрезвычайно необходимый этап производственной деятельности, позволяющий вовремя предупредить, а возможно, исключить брак по мере изготовления продукции производством. Во время объединения готовой округлой продукции в целый рабочий механизм, будет сильно прослеживаться её не овальность, так как недопустимые отклонения будут визуально заметны сразу или в процессе запуска механизма в будущем.

Необходимо отметить, что на стадии разработки тестовых образцов для дальнейших испытаний важно сразу выбирать необходимый квалитет шероховатости той или иной детали, так как это напрямую скажется на износостойкость, а значит повлияет на КПД и усталостную прочность с течением времени эксплуатации. Можно добавить, что при всех нынешних современных возможностях металлообрабатывающей индустрии в целом не получится добиться «идеального» качества поверхности, что обуславливается физической невозможностью достижения такового.

Ультразвуковой способ пластического деформирования поверхности увеличивает исходные показатели характеристик поверхностного слоя. Твёрдость, остаточные сжимающие напряжение и регулярный микрорельеф в совокупности с высокими квалитетами шероховатости позволяют рассматривать этот способ как высокотехнологичный метод финишной обработки деталей.

1.4.1 Анализ параметров, характеризующих состояние качества поверхности

Многие исчерпывающие работы по установлению зависимости качества поверхностного слоя и дальнейшими их эксплуатационными характеристиками провели отечественные учёные, И.В. Крагельский А. А. Маталин, Э.В. Рыжов, А. Г. Сулов. Ученые в своих исследованиях изучали как зависит различные типы механических обработок поверхности на конечные результаты формирования шероховатости, а также как влияет шероховатость поверхности на эксплуатационные характеристики деталей и узлов машин в действии. В этих работах отечественные учёные указывали на прямую зависимость многих эксплуатационных свойств детали от величины шероховатости поверхности. В ходе исследований авторы пытались более подробно разобрать стандартные показатели величин шероховатости и пришли к выводу, что теоретических знаний только о общепринятых Ra

показателях недостаточны чтобы сделать объективный вывод о том, как качество поверхностного слоя может влиять на деталь при её эксплуатации. Кроме того, никаких теоретических знаний о профиле опорной поверхности до того момента описано не было, а значит существовала вероятность ошибочных суждений при объективной оценке поверхностного слоя. В ходе анализа отечественными учёными научной литературы, которая базировалась на описании профиля поверхности было обнаружено, что теоретически модель не могла представить сложные фигуры при описании профиля, а лишь описывала её элементарными геометрическими фигурами, такими как цилиндр или конус.

В ходе механической обработки поверхностного слоя у детали образуется специфичный микропрофиль, который будет иметь свои особенности при различных видах обработки. Основными показателями поверхностей при объективной оценке топографии служат такие показатели как: шероховатость, макроотклонения, волнистость, а также субшероховатость. Исходя из этих параметров можно схематично изобразить случайный профиль поверхности образца с обозначениями (Рисунок 6)

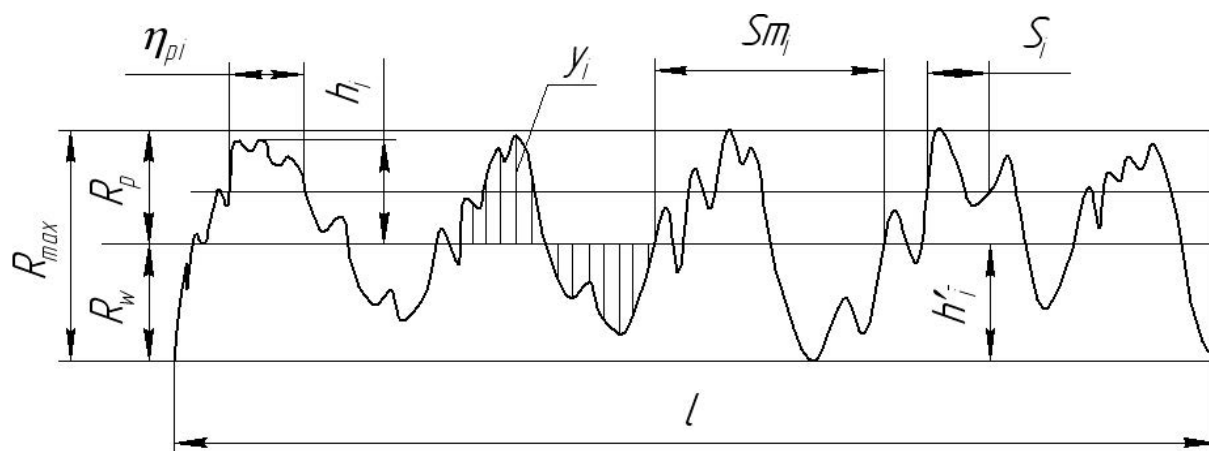


Рисунок 6 – профилограмма поверхности

На основании ГОСТ [11], по количественной оценки, топографии который действует и по сегодняшний день можно составить основные параметры характеризующие особенности профиля поверхности. Нельзя не заметить, что в настоящее время практически все методы модификации

поверхностей стандартизованы строго для получения стандартных показателей профиля поверхности. Из параметров можно отметить: средний шаг местных выступов поверхности, максимальная высота отклонения профиля, среднеарифметическое отклонение профиля, относительная длина профиля.

В оценке параметров микрогеометрии применяют и альтернативные значения профиля поверхности [19], которые аналогично вышеописанным непосредственно имеют значение в ходе эксплуатации деталей и узлов. Это такие характеристики как: коэффициент заполнения профиля, средне-квадратичное отклонение профиля, начала участка кривой опорной поверхности, высота сглаживания профиля шероховатости глубина сглаживания поверхности. Отдельно можно обозначить выступы поверхности у топографии образца: средний радиус местного выступа и средняя окружность профиля поверхности.

Таблица 1. – Зависимость величины параметров шероховатости от длины неровности

R_a , мкм	$R_z = R_{max}$, мкм	l , мм
>0,030	>0,10 0,	0,08
0,025...0,4	10...1,6	0,25
0,4...3,2	1,6...12,5	0,8
3,2...12,5	12,5...50	2,5
12,5...100	50...400	8,0

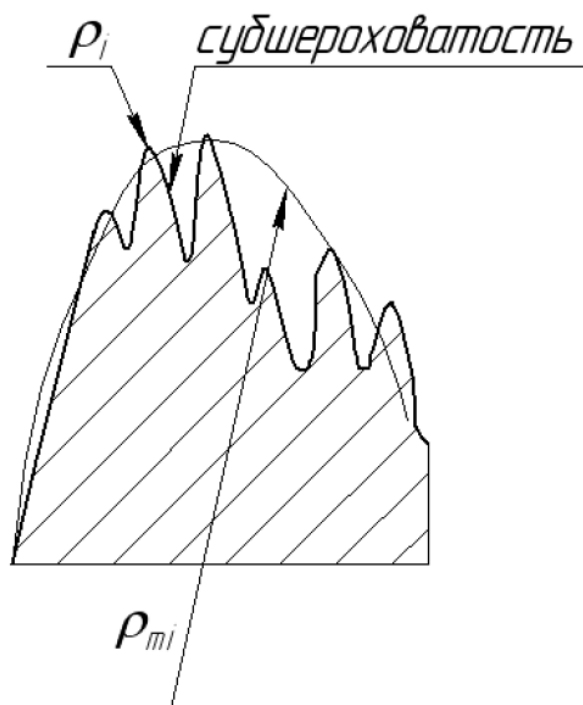


Рисунок 7 – Схематичное обозначение одной неровности профиля

Поскольку множественные перепады поверхности профиля ложатся на параметр шероховатости поверхностного слоя вместе они образуют субшероховатость. В исследованиях Бажакина [14] наглядно отражено как субшероховатость может описывать различного рода неровности.

1.4.2 Влияние существующих способов токарной обработки на эксплуатационные характеристики

С автомобильной отрасли сегодня приведено десятки теоретических и экспериментальных исследований о том, как влияет поверхностный слой на эксплуатацию улов и механизмов в работе. [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Детали, которым больше всего требуют надёжной и бесперебойной работы необходимо тщательно контролировать все параметры, которые могут повлиять на их дальнейшую эксплуатацию. Поэтому для таких деталей после

завершения финишных обработок перед эксплуатацией различают не только общепринятые значения высот профиля, но а также шаговую размерность неровностей (S_m / S), другой немаловажной характеристикой для ответственных деталей является величина опорной длины tr . Совокупность, а так же контроль этих параметров позволяют добиться надёжной и безопасной работой механизмов и узлов в процессе их эксплуатации. [12]

Таблица 2. Зависимость качества поверхностного слоя от предшествующего вида обработки поверхности

Вид обработки	Свойства поверхности после обработки		
	R_a , мкм	S_m , мм	R_p , мкм
Токарная обработка			
грубая	13-42	0,35-1,21	33-125
получистовая	3-18	0,15-0,38	7-51
финишная	0,9-2,7	0,1-0,17	3-9

В ходе анализа работ по зависимости параметров поверхностного слоя от характеризующих свойств деталей и узлов в процессе эксплуатации в исследовании [9] была описана исчерпывающая характеристика взаимосвязи между этими двумя параметрами. Приняв во внимание величины параметров поверхности после различных технологических обработок поверхностей можно сделать вывод, что абсолютно все параметры поверхности могут влияют на качество поверхности.

Таблица 3. – Обозначения свойств поверхности, а также их сокращения

Характеристика	Номенклатура
Износостойкость	$R_a (R_z)$
Устойчивость к вибрациям	$R_a (R_z), S_m, S,$
Жесткость	$R_a (R_z), t_p$
Прочность	$R_a (R_z)$
Прочность при знакопеременных нагрузках	$R_{max}, S_m, S,$
Герметичность	$R_a (R_z), R_{max}, t_p$

Таблица 4. – Зависимость параметров поверхности от их характеристик в работе

Характеристика	Параметры качества поверхностного слоя					
	R_a, R_z	R_{max}	S_m	S	t_p	R_p
Жесткость	-	-	+	0	+*	-*
Коэффициент трения	+	+	-	-	-*	+*
Износостойкость	-	-	+*	+	+*	-*
Герметичность	-	-	-*	-	+*	-*
Прочность посадок	-	-	-	0	+*	-*
Усталостная прочность деталей	-	-*	+*	0	-	+
Стойкость к коррозии	-*	-	+*	+*	+	-
Теплостойкость	-	-	+	0	+	-

1.4.3 Методы количественной оценки топографии поверхностей с помощью аппарата фрактальной геометрии

Для правильной и объективной оценки качества поверхности на сегодняшний день используют теоретические знания о размерности фракталлов. В исчерпывающих работах наших исследователей показано как можно применять теорию фрактальной размерности на практике. Этими учёными являлись С.А. Кулюков, П.С. Лобутин, П.В. Айгеров, А.В. Опрышка, С.Ю. Клеменко, В.А. Кардюков, П.А. Лобутин. [16]. Ученые в своих исследованиях изучали фрактальную структуру, которая позволяла более масштабно раздвинуть границы понимания состояния поверхностного слоя. С помощью знаний, полученных в результате анализа поверхности возможно объективно оценивать шероховатость поверхности все зависимости от ранее представленных элементарных геометрических фигур (сфера, угол, цилиндр). При анализе работ [17] было выявлено, что в них фрактальная структура определяется как способ качественной оценки поверхности, так как фрактальная теория не принимает во внимание формы различных сегментов неровности, а также как часто они встречаются на поверхности. На сегодняшний день такой способ оценивания состояния микропрофиля поверхности при помощи фрактальной геометрии затмил все предыдущие способы оценки и показал свою эффективность на практике. [13]

При помощи направленных энергетических потоков учёные создали новое понимание при формировании механической обработкой топографии поверхностного слоя. На примере устаревших, общепринятых геометрических фигур, применяемых в качестве измерения количественной микрогеометрии становится ясно, что такой метод на сегодня не позволяет сделать правильные выводы о состоянии поверхности, поэтому необходимы более объективные способы нахождения несовершенств профиля поверхности.

Примером одного из современных методов исследования поверхности можно назвать фрактально геометрический способ, который первым предложил применять варшавский ученый Мандельброт. Суть этого метода заключается в нахождении единичной микронеровности, подобной самому себе, а затем, применяя математическую модель, рассматривать всю поверхность как массив из повторяющихся одинаковых неровностей. Следует отметить, что частота повторения элементов не может быть хаотичной, а будет иметь некую закономерность на всем протяжении рассматриваемой поверхности.

Мандельброт трактовал свою теорию фракталов как определённую математическую модель, которая повторялась по мере рассмотрения профиля поверхности образца. Такую закономерность можно описать так, что абсолютной любая зона фрактала может повторяться всему массиву в целом. Рассматривая понятие «фрактала» с математической точки зрения можно описать её как n -количество точно в евклидовом пространстве. С точки зрения Миковского математическая модель фракталов могут иметь дробную метрическую размерность. Есть и другая теория, которая подразумевает рассмотрение модели фракталом под метрической размерностью, которая сильно отличается от топологической. Рассматривая эти два понятия размерность необходимо понимать различия от некоторых других фигур геометрической формы, которые несут в себе определённое (ограниченное) число звеньев в своей структуре. [15]

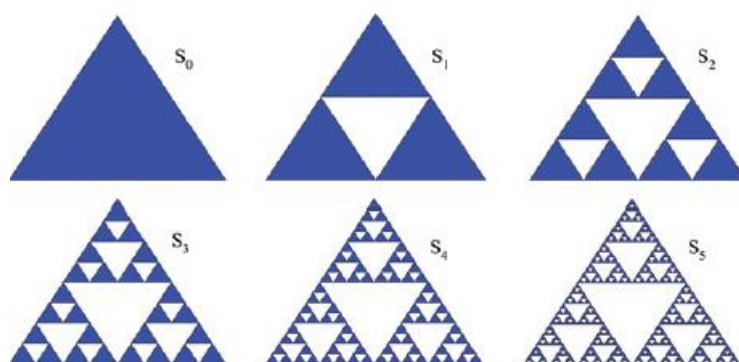


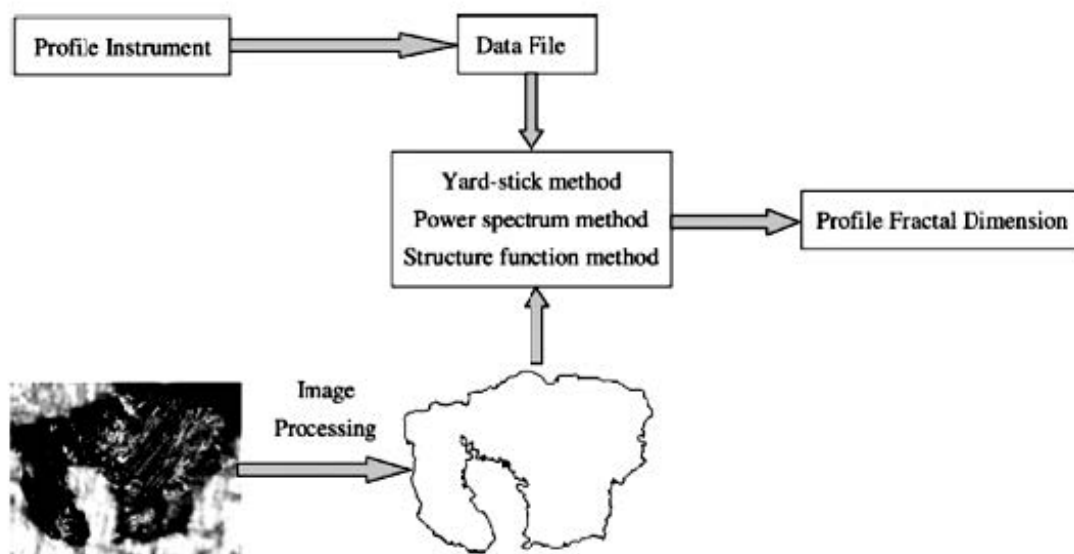
Рисунок 8 – Построение типичных фрактальных фигур по модели Серпинского.

Исходя из теоретических исследований различают различные фрактальными структуры, например, 2D или 3D. Определения необходимого варианта нахождения (2D/3D) измерений базируется на количестве плоскостей в пространстве. В случае рассмотрения на плоскости 2D – необходимо производить расчёт фрактальной размерности, а в трёхмерной плоскости 3D – структуры самих исследуемых фракталов. Существует множество различных методов для определения размерности фракталов, каждый из которых имеет свои особенности и нюансы.

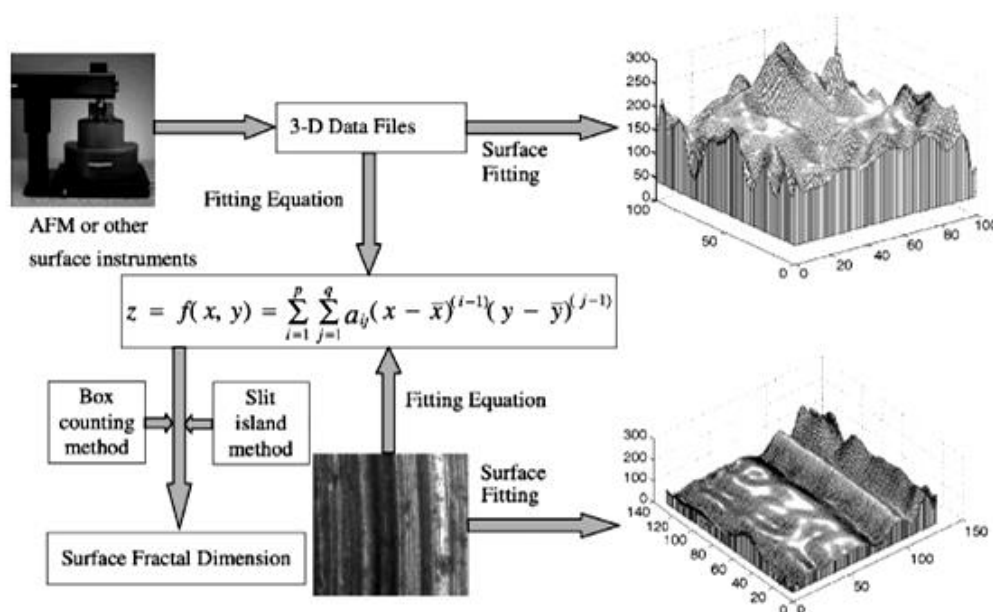
В случае нахождения профиля по двумерной плоскости применяют следующие варианты: метод анализа отрезков (yardstick method), вариационный метод (variation), метод структурных функций (the structure function), метод «призиционного» анализа (Precision analysis) и метод, основанный на анализе мощности спектра изучаемой фрактальной структуры (power spectrum method).

Для расчета фрактальной размерности поверхности для трёхмерной структуры применяют следующие способы: (box counting), Slit island method (SIM) (метод выборочного анализа), а также метод «призиционного» анализа (Precision analysis).

Для наглядности последовательности нахождения фрактальной размерности (2D/3D) на рисунке 9 схематично представлен процесс.



a)



б)

Рисунок 9 – Процесс нахождения фрактальной размерности (а) и поверхности (б)

Вследствие различных методов механической обработки фрактальность обработанных поверхностей подразумевает вероятность возникновения кластерного механизма создания поверхностного слоя.

Глава 2 Методика экспериментальных исследований

2.1 Оборудование, инструмент и оснастка

Испытания по упрочнению поверхностного слоя выполняли на станке с числовым программным управлением (ЧПУ) модели 16Б16Т1С1. Данная модель является отечественной разработкой и дооснащена для ультразвуковой обработки.



Рисунок 10 – станок токарный с ЧПУ 16П16Т1С1, оснащенный для УЗО

В ходе проведения испытаний было использовано необходимое оснащение для выглаживания: генератор ультразвуковых частот УЗГ-0,4/23 мощностью 400 Вт (Рисунок 11)– его частоту настроили на 23 кГц. [...]

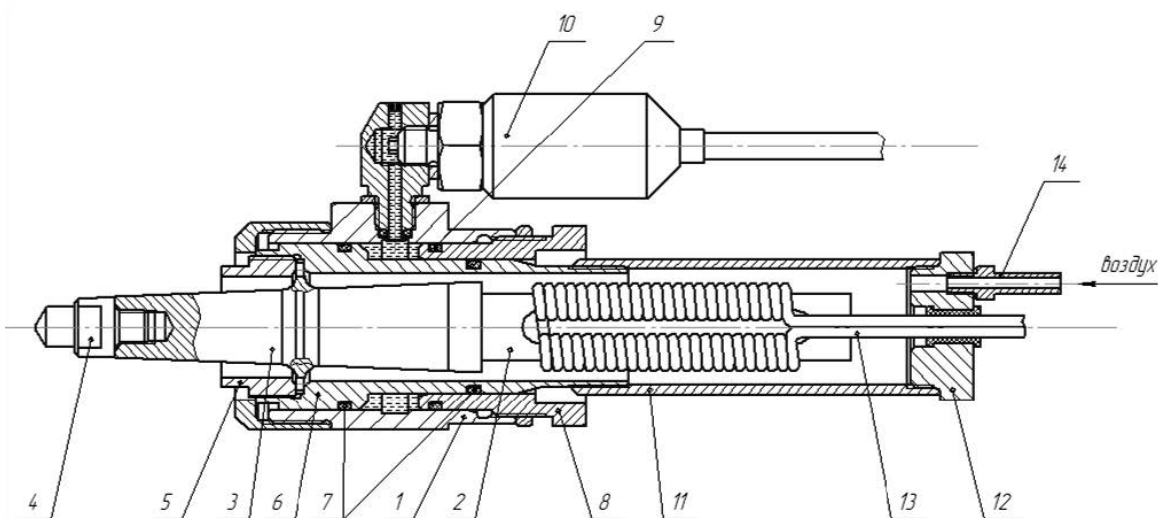


Рисунок 11 – Схема расположения элементов в устройстве для УЗО

Таблица 5 – Составляющие элементы ультразвукового устройства

1	Акустическая система ультразвуковых волн
2	Преобразователь частот
3	Волновод
4	Излучатель ультразвуковых частот
5	Крепёж для акустической системы
6	Поршень шток
7	Уплотнение гидравлическое
8	Направляющая втулка
9	Уплотнение гидравлическое
10	Датчик электронный
11	Втулка защитная
12	Пробка технологическая
13	Обмотка преобразователя

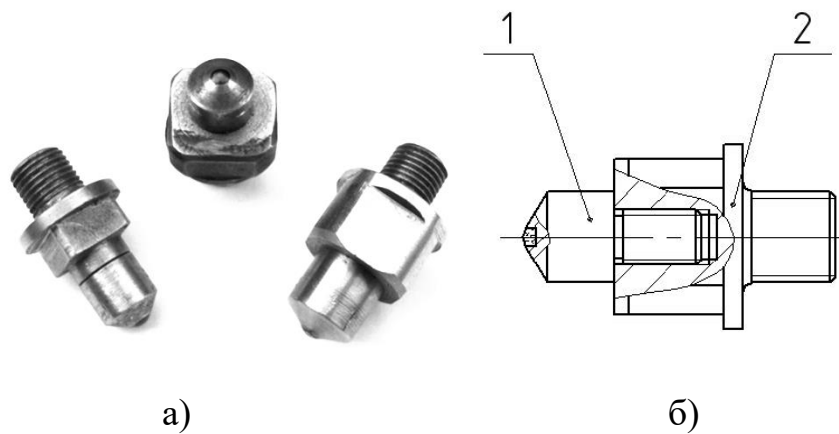


Рисунок 12 а) эскиз головки для УЗО б) сферический выглаживатель

1 – сферический инструмент по ТУ2-37-500-84С, 2 – переходник

Ультразвуковой прибор для упрочения запитали от генератора ультразвуковых частот и подсоединили к волноводу конической формы, который имеет два торца 25 и 17 мм соответственно. К задней стенке волновода был присоединен ультразвуковой инструмент для выглаживания поверхности. В качестве оптимального деформирующего элемента был выбран природный аммаз по ТУ 2-038-486-88. Для достижения минимального износа инструмента была выбрана его сферическая форма с радиусом 2.5 мм исполнения II. (Рисунок 12)

Для достижения необходимого статического усилия на поверхности ультразвуковую колебательную систему установили с возможностью регулировки за счёт гидравлики. За счёт манометра осуществляли контроль усилия на поверхности заготовки, который был смонтирован в установку.

2.2 Образцы для исследований и режимы обработки

Для наших экспериментов были выбраны кольца из закаленной стали ХВГ (HRC 60...63) с высотой $24 \pm 0,5$ мм и диаметром $60 \pm 0,2$ мм. До начала выглаживания была выполнена обработки торцев путем шлифования и их

твёрдого точения. Для проведения сравнительного анализа обработку выполняли несколькими методами по торцевым поверхностям образцов. Поверхность образцов на первоначальной стадии по Ra после шлифования составляла 0,4...0,6 мкм. После обработки образцов твёрдым точением увеличилась до 1.6...2 мкм.

Режимы обработки поверхности при упрочнении были выбраны экспериментальным путём и составляли: продольная подача выглаживающего инструмента 0.08 мм-об, статическое давление на поверхность образца 0,2 МПа, частота работы выглаживающего инструмента 22 КГц, скорость вращения образца 450 об/мин, амплитуда работы выглаживающего инструмента 10 мкм

Режимы обработки поверхности при упрочнении были выбраны экспериментальным путём и составляли: продольная подача инструмента $s=0.1$ мм/об, скорость вращения шпинделя $n=450$ об/мин, давление гидроблока 0,2 МПа, частота работы выглаживающего инструмента 21 кГц, амплитуда колебаний инструмента 10 мкм.

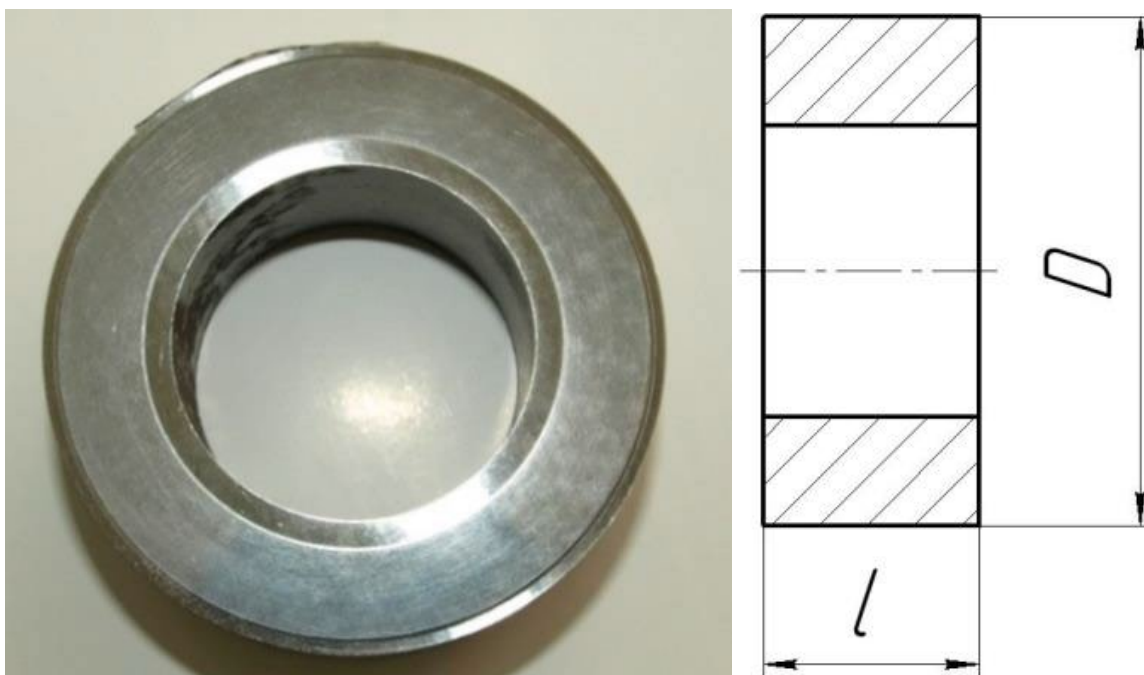


Рисунок 13 – фото и чертёж образцов для испытаний

Таблица 6 – Инструменты и режимы их обработки

	Точение черновое	Точение чистовое	Шлифование	Алмазное выглаживание	
				с УЗК	без УЗК
Приспособл ения	резец PDJNR 2824 M12; пластина DNMG18071	резец PCLNR 2824 M14; пластина CNMG14050	Круг шлифовочный 28A45C18K7	Сферическая отделочная головка с покрытием из алмазного напыления	
Парамет ры выглажив ания	$v = 140$ м/мин; $s = 0,18$ мм/об $t_1 = 0,2$ мм	$v = 150$ м/мин; $s = 0,1$ мм/об $t_2 = 0,08$ мм	$v_{kp} = 30$ м/с; $v_m = 0,15$ м/с $t_3 = 0,08$ мм	$v = 30$ м/мин; $s = 0,08$ мм/об $R = 3$ мм	
				$\xi = 10$ МКМ $f = 22$ кГц	—

В ходе проведения эксперимента при завершении каждой операции выполнять замер шероховатости поверхностного слоя по торцу. Затем, составлялась профилограмма поверхности.

Глава 3 Результаты экспериментальных исследований формирования шероховатости

Для определения качества поверхности у готовых деталей применяли японский измерительный профилометр-профилограф от компании Mitutoyo Surfest модели SJ-210 (рисунок 14, 15). После определения шероховатости была проведена объективная оценка топографии у всех поверхностей деталей на микроскопе Axiovert 40MAT. В целях обеспечения наилучших и объективных оценок качеств шероховатости каждую деталь измеряли по 4 раза, а затем все полученные результаты записывали. После работы с профилометром полученные данные профилограмм использовали как статистические данные от каждого отдельного образца.

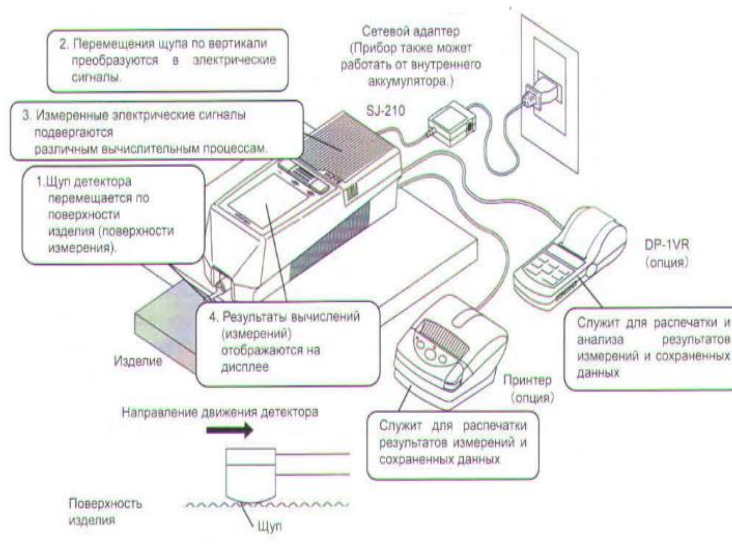


Рисунок 14 – Схема подключения прибора Mitutoyo SJ-210, соединение с дополнительными модулями



Рисунок 15 – Лабораторная фиксация шероховатости прибором Mitutoyo SJ-210

На диаграмме (рисунок 16) наглядно отражены изменения шероховатости Ra по сравнению с первоначальной шероховатостью, а также после шлифования. После оценки результатов можно отметить, что обработка с ультразвуком и без позволяет добиться в два раза уменьшить параметр Ra по сравнению с необработанной поверхностью. Эту разницу можно объяснить тем, что во время прохода инструмента возникает деформация на поверхности, которая сглаживает «неровности» - за счёт этого шероховатость уменьшается. Между тем, самые положительные результаты шероховатости после обработки УЗУ (Ra 0,16; 0,15 мкм) получилось добиться при весьма небольшом давлении на поверхностный слой (давление в гидросистеме не превышало 0,2 МПа)

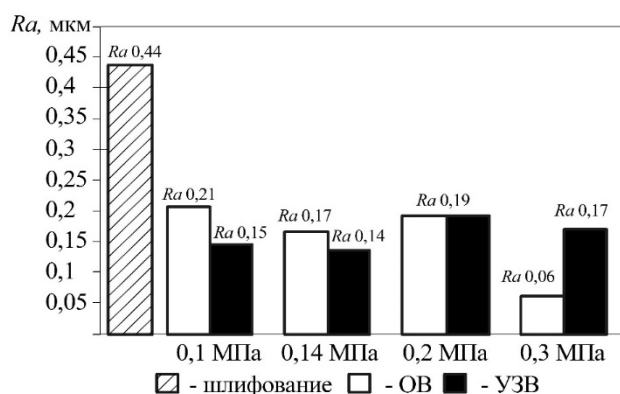


Рисунок 16 – Среднее отклонение шероховатости. ОВ – обычное выглаживание, УЗВ – выглаживание с ультразвуком.

Экспериментальным путём было выяснено, что при повышении давления в гидросистеме параметр шероховатости составил 0,07 мкм, что меньше чем при обычном выглаживании. Однако при давлении 0.3+ МПа параметр шероховатости при ультразвуковой обработке был хуже и составил 0.19 мкм.

Ухудшение шероховатости при повышении давления на поверхностный слой можно объяснить необходимостью вкладывать более значительные силы для пластической деформации для, обработки закалённой стали, так как размер деформирующего элемента составляет 2.5 мм. В случае влияния УЗУ для возникновения пластической деформации необходимы сравнительно небольшие давления на поверхностный слой. После повышения давления на поверхность мы получили ухудшение качества поверхностного слоя так как это связано с тем, что в очаге нагрузок на образец возникают многочисленные деформации, связанные с давлением на поверхность, а также частотой ультразвуковых колебаний.

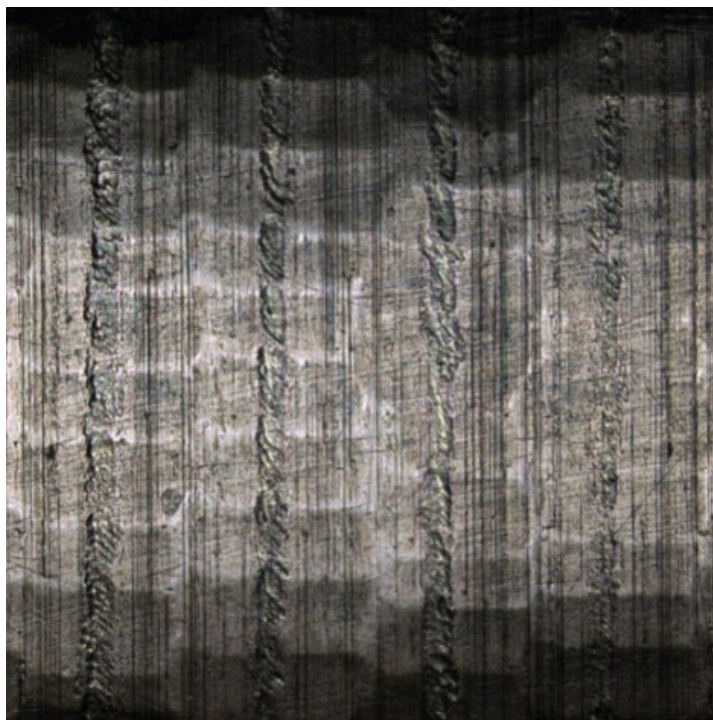


Рисунок 17 – Поверхность с образца после выглаживания с ультразвуком

Профилограммы и поверхностные снимки поверхностей образцов представлены на рисунке 18, выполненные при помощи Axiovert 40MAT,

кратность $\times 450$. Сравнивая все снимки можно заметить заметную разницу в формировании микрогеометрии на поверхностях обработанных деталей, а именно, что после операции шлифования отчётливо просматриваются следы от шлифовочного круга на поверхности (рисунок 18 а); после выглаживания без использования энергии ультразвука – следы ровного, направленного характера (рисунок 18 б, г); а также после ультразвуковой обработки видна поверхность со следами отделочной головки за счёт высокочастотной работы генератора частот.

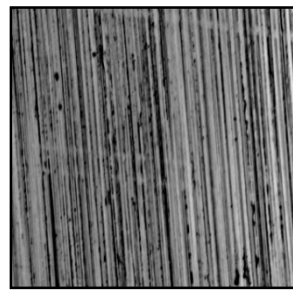
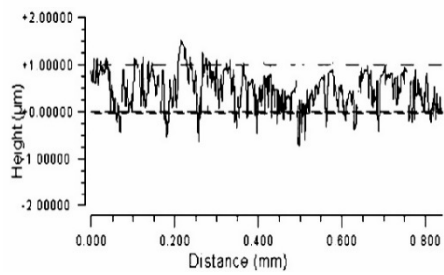
Если рассматривать операцию шлифования, то её микропрофиль имеет острые, чередующиеся «выступы» и «ямы», которые имеют все методы абразивной обработки

Рассматривая, в частности, профилограмму можно отметить, что она имеет две составляющие микрорельефа, а именно: высокочастотные или низкочастотные.

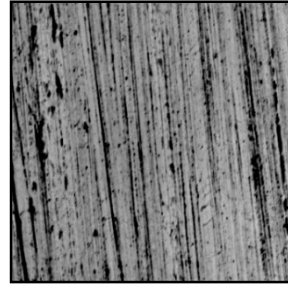
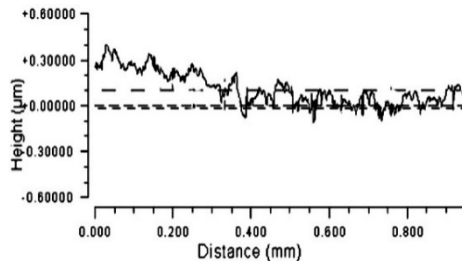
Низкочастотные значения поверхности формируют наибольшие значения неровностей. Такое явление можно охарактеризовать образованием резбового профиля, в то время как шлифовальный круг проходит по его поверхности, тем самым копируя свою форму

От параметров режима шлифования и характеристик самого круга зависят высокочастотные значения. .

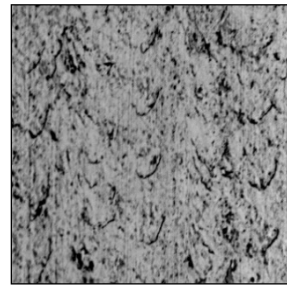
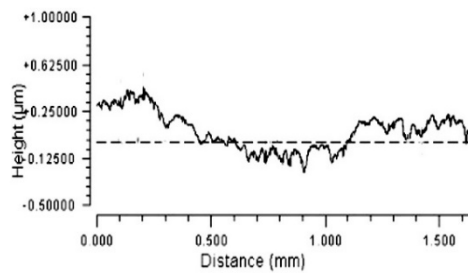
При усилии на поверхностный слой 0,1 Мпа и менее можно наблюдать неполное выравнивание следов от шлифующего круга (рисунок 18 б). Между тем, при использовании выглаживания без энергии ультразвука наблюдается много более округлая геометрия выступов что соответствует данному виду выглаживая и подтверждает высокую эффективность применения ультразвуковых колебаний.



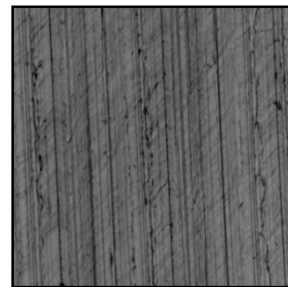
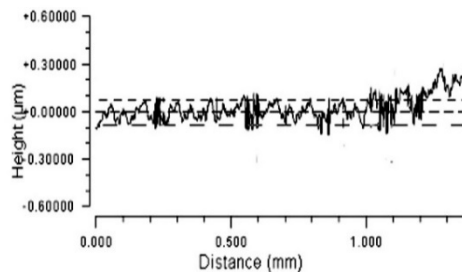
а



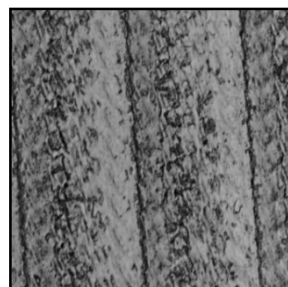
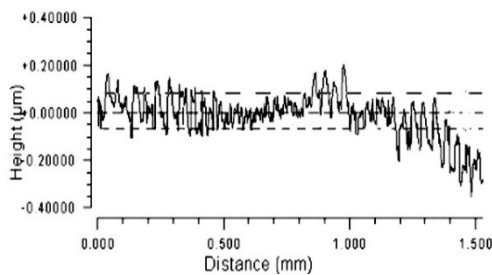
б



в



г)



д

Рис. 18 . Совмещённые данные с профилометра и микроскопа после обработки обычным шлифованием (а), ультразвуковым способом (б – д):, (б)обычным выглаживанием с усилием 0,1 МПа, (в) ультразвуковым способом с усилием 0,1 МПа, (г) обычным выглаживанием с усилием 0,3 МПа, (д) ультразвуковое выглаживание с усилием 0,3 МПа

Если давление на поверхность образца увеличивать практически до 0,4 МПа можно наблюдать практически полное нивелирование шлифовочных рисок (рисунок 18 г). В зависимости от направления подачи на поверхностном слое возникают следы с определенным шагом, которые можно охарактеризовать инструментом с формой сферы, который был применён в качестве деформирующего элемента.

Образцы после ультразвуковой обработки имеют существенное отличие в форме профиля при одинаковых давлениях на поверхностный слой (рисунок 18 в, д). Так как деформирующий элемент, в отличие от классического выглаживания, делает множественные колебания со скоростью ультразвука, физические процессы в очаге контакта отличаются от вышеописанных методов и наилучшим образом влияют на шероховатость и качество поверхностного слоя [7].

На рисунке 18 отражено, что при давлении на поверхностный слой 0,1 МПа можно наблюдать полное отсутствие следов и рисок от воздействия выглаживающего инструмента. Можно сделать вывод, что при маленьких усилиях прижима инструмента деформирующий элемент углубляется на небольшое расстояние в поверхностный слой, выглаживая выступы первоначальной шероховатости, а ультразвуковое воздействие позволяет добиться полного сглаживания профиля поверхности. В ходе объективной оценке работы ультразвукового инструмента при давлении 0,3 МПа можно отметить остаточные следы от инструмента и имеют последовательный порядок по типу «резьбы». Однако, топография поверхности имеет сильно деформируемую структуру и типичные для простых видов выглаживания риски отсутствуют.

Это можно охарактеризовать более глубоким внедрением деформирующего элемента в поверхность при больших усилиях статического усилия, почти на всю глубину первоначального профиля, тем самым вмяная все выступы микропрофиля во впадины.

Следует отметить, что ультразвуковое воздействие предопределяет многократную деформацию поверхностного слоя, обуславливая следы от работы инструмента.

С помощью сканирующего микроскопа мы получили трехмерные топографии которые представлены на рисунке 19, где каждая поверхность прошла различный тип обработки: токарная обработка точением, выглаживание без применения ультразвуковых колебаний, выглаживание с применением ультразвуковых колебаний. Начнём с рисунка 19 а, где поверхность обрабатывалась токарной обработкой, тут можно наблюдать профиль с определенным шагом, который образовался из-за копирования профиля абразивного инструмента. На топографии рисунка 19 б, в после обычного и ультразвукового выглаживания профиль поверхности более сглаженный. Но стоит отметить, что результате обычного выглаживания без ультразвука можно наблюдать следы от токарной обработки, которая предшествовала ранее.

После ультразвуковой обработки поверхностного слоя топография образца имеет упорядоченную пластически деформированную структуру. По ходу вращения заготовки с одинаковым шагом можно наблюдать деформированную структуру профиля поверхности, которая подверглась ударным воздействиям со стороны деформирующего элемента. Также можно наблюдать сильнодеформированные валики материала, сформировавшиеся за счёт многоциклового деформации и перемещения инструмента по поверхности.

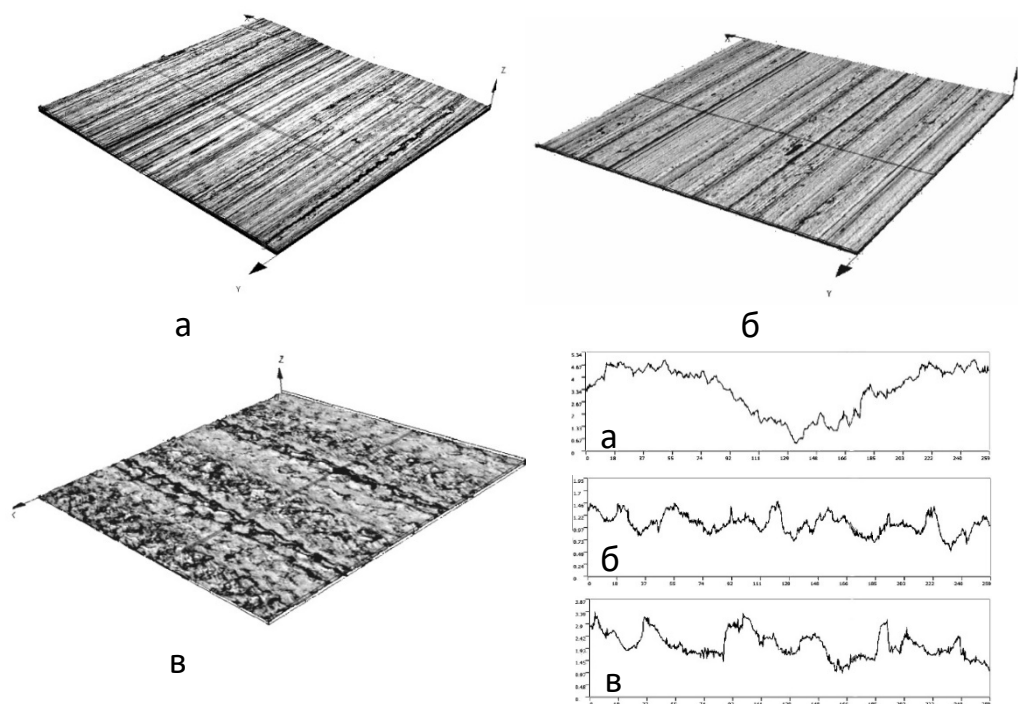


Рисунок 19 - Трехмерная топография поверхностей после твердого течения (а), обычного выглаживания (б) и ультразвукового выглаживания

Из рисунка 20 в наглядно просматривается регулярный рельеф поверхности после обработки ультразвуковым упрочнением, где на профилограмма поверхности сильно отличается от поверхностей после обработки классическими методами обработки поверхностей без использования энергии ультразвука

Заключение

После проведения эксперимента было установлено, что в технологическом процессе ультразвукового упрочнения поверхностей существует прямая связь между параметрами выглаживания (скорость вращения заготовки, продольная подача деформирующего инструмента, величина статического усилия на поверхностный слой, а также частота работы инструмента) на топографию и микрогеометрию обрабатываемых деталей. После анализа уже существующих способов упрочнения метод ультразвукового выглаживания он показал конкурентные характеристики чистоты поверхности среди классических способов упрочнения поверхностного слоя, поэтому может являться перспективным методом операции финишной обработки поверхности. Следует отметить, что за счёт особенностей применения этого метода его можно рассматривать как альтернативу абразивным методам обработки поверхностей. Для объективной оценки качества поверхности применяли оценку фрактальных характеристик при помощи периферийного оборудования.

После применения ультразвуковой упрочняющей обработки можно наблюдать следующие технологические характеристики поверхности:

- 1) обеспечение шероховатости поверхности 0,2...0,4 мкм по Ra
- 2) повышение микротвердости поверхностного слоя до 50 %
- 3) формирование сжимающих остаточных напряжений
- 4) сравнительно невысокие усилия обработки (возможность обработки тонкостенных изделий)
- 5) улучшение стойкости поверхности к коррозии
- 6) возможность использовать на универсальном металлорежущем оборудовании и на станках с ЧПУ
- 7) возможность обработки твердых материалов

Список используемых источников

1. Барац Я.И. Оптимальное сочетание методов ППД при финишной обработке сопрягаемых поверхностей, работающих в условиях трения скольжения // Надежность механических систем: науч. конференция. – 1995. – С. 19–20.
2. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.08 / В. Ю. Блюменштейн. - Москва, 2002
3. Бобровский Н. М. Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. – Тольятти: Тольяттинский гос. университет, 2008. – 170с
4. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» 2001.
5. Грановский Э.Г. Исследование износостойкости алмазных инструментов для выглаживания / Э. Г. Грановский // Алмазы. - 1966. - №1. - С. 100.
6. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 244 с.
7. Дунин-Барковский И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. - Москва: Машиностроение, 1978 г. с.121-130

8. Костецкий Б.И., Качество поверхности и трение в машинах.
«Техника»/ Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колесниченко. – Изд. «Техника».
– 1969. – 216 с.
9. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки
рациональным использованием энергии ультразвукового поля. /
Е.С.
10. Киселев Е.С. Использование ультразвука при обработке заготовок
шлифованием и выглаживанием / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов,
З.В.
11. Костецкий Б.И., Колесниченко Н.Ф. Качество поверхности и тре-ние в
машинах. «Техника», 1969, 216 с.
12. Муханов, И.И. Упрочнение стальных деталей шариком,
вибрирующим с ультразвуковой частотой / И.И. Муханов, Ю.М.
ЗГолубев // Вестник машиностроения. – 1966. – № 11. – С. 52–53.
13. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным
выглаживанием и вибровыглаживанием. – М.: Машиностроение,
1981. – 160с.
14. Стандарт ISO 4287:1998. Геометрические характеристики изделий.
Структура поверхности: профильный метод. Термины, определения и
параметры структуры. М., 1999
15. Степчева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007–№8. – С. 43-
53.
16. Старосельский А.А. Долговечность трущихся деталей машин / А.А.
Старосельский, Д.Н. Гаркунов, М: «Машиностроение». – 1967. – 266 с.
17. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г.
Суслов, А.М. Дальский. М.: Машиностроение. – 2002. – 684 с.
18. Торбило, В.М. Геометрия области контакта движущегося
сферического индентора при алмазном выглаживании / В.М. Торбило
// Машиноведение. – 1981. – № 4 Одинцов Л.Г. Финишная обработка

- деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. – М.: Машиностроение, 1981. – 160
19. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 104с.
 20. A. Rodr´iguez, L. N. L. de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, and J. Albizuri, “Surface improvement of shafts by the deep ball- burnishing technique,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, no. 11-12, pp. 2817–2824, 2012.
 21. J. Huuki and S. V. A. Laakso, “Integrity of surfaces finished with ultrasonic burnishing,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 227, no. 1, pp. 45–53, 2013.
 22. M. Hokkanen, “Ultra burnishing,” *The Hiqusa Report*, Tampere University of Technology, 2006, http://www.hiqusa.com/hiqusa_report.pdf.
 23. M. Hokkanen, “Ultra burnishing,” *The Hiqusa Report*, Tampere University of Technology, 2006, http://www.hiqusa.com/hiqusa_report.pdf.
 24. L. N. L. de Lacalle, A. Lamikiz, J. Mu ~ noa, and J. A. S ´ anchez, “Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 15, pp. 1659–1668, 2005.