

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»

На правах рукописи



Симонов Дмитрий Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ
УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

Специальности: 2.5.5 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки; 2.5.6 – Технология машиностроения

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
член-корр. РАН
доктор технических наук, профессор
Приходько Вячеслав Михайлович

Москва 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА И ХТО	10
1.1. Современное представление о процессах повышения долговечности деталей машин.....	10
1.2. Особенности поверхностного пластического деформирования ...	13
1.3. Поверхностное пластическое деформирование с ультразвуком.....	19
1.4. Влияние ультразвуковой обработки на свойства поверхностного слоя	25
1.5. Химико-термическая обработка с ультразвуком.....	27
1.6. Магнитострикционные и пьезокерамические преобразователи для ультразвуковых технологий.....	30
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	40
2.1. Методика общих исследований.....	40
2.2. Методика исследование УЗКС.....	45
2.3. Исследование износостойкости.....	48
2.4. Методика измерения шероховатости поверхности R_a , относительной опорной длины профиля t_p , твердости и микротвердости.....	50
2.5. Методика рентгенографического исследования параметров тонкой структуры и оценка остаточных напряжений.....	51
2.6. Методика обработки экспериментальных данных.....	52
ГЛАВА 3. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПИД С УЛЬТРАЗВУКОМ	55
3.1. Теоретический анализ высокоамплитудных УЗКС	55
3.2. Практическая реализация высокоамплитудных колебательных систем	63

3.3. Исследование высокоамплитудных УЗКС.....	65
3.4.УЗКС для ультразвукового поверхностного пластического деформирования	70
3.5. Обсуждение результатов и выводы.....	72
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	74
4.1. Результаты исследования ППД с ультразвуком.....	74
4.2.Структурные изменения поверхности материала после ППД с УЗО.....	80
4.3. Влияние ППД с УЗО на износостойкость.....	85
4.4. Азотирование с ультразвуком.....	89
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ППД.....	94
5.1. Сравнительная характеристика комбинированных способов ППД.....	94
5.2. Комбинированная обработка удлиненных деталей ППД с ультразвуком.....	106
5.3. Технологические рекомендации по ультразвуковому ППД нежестких валов.....	112
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Разработка технологий для получения требуемых эксплуатационных свойств изделий транспортной техники, является приоритетным направлением инновационного развития России, обеспечения ее технологического суверенитета. Одним из важнейших современных направлений развития машиностроения является разработка комбинированных и совмещенных технологических процессов с использованием существующих и новых методов обеспечения эксплуатационных свойств поверхностного слоя на стальных изделиях. Формирование стойких поверхностных слоев на углеродистых и малолегированных сталях способствует увеличению сроков службы изделий, позволяет снизить расход применяемых материалов, издержки на их производство и обработку, что позволяет решить насущную проблему повышения энергоэффективности, ресурсосбережения и интенсификации при механической обработке.

Известны технологии, в частности, поверхностное пластическое деформирование (ППД) с ультразвуком и химико-термическая обработка (ХТО), например, азотирование, которые позволяют улучшить эксплуатационные свойства поверхности изделий, снизить шероховатость и повысить микротвердость, создать остаточное напряжения сжатия. Основным фактором, определяющим эффективность ультразвуковой технологии ППД, является амплитуда смещений рабочего инструмента-индентора, в этой связи актуальна разработка способов повышения энергоэффективности колебательных систем.

Технологии ХТО имеют высокий потенциал управления структурно-фазовым состоянием. Совершенствование способов ХТО идет в направлениях изыскания новых факторов регулирования процесса для получения заданного уровня упрочнения и способов интенсификации процесса, поскольку низкотемпературные процессы, такие как азотирование, требуют значительного времени обработки.

Особую сложность представляют длинномерные детали, которые относятся к типу нежестких валов ($L/D > 12$) и требуют равномерной обработки по всей длине детали, что может обеспечиваться снижением усилий при ППД с ультразвуком. К таким деталям относятся штоки гидроцилиндров, оси коромысел и другие детали цилиндрической формы.

Цель работы – повышение эффективности обработки длинномерных цилиндрических деталей из конструкционных сталей путем разработки и применения комбинированных способов обработки ППД с наложением ультразвуковых колебаний и ХТО.

Объект исследования – технологические процессы комбинированной обработки поверхности стальных изделий ППД с использованием ультразвука и ХТО.

Предмет исследования – влияние комбинированных технологических процессов ППД с ультразвуком и ХТО на параметры качества поверхностного слоя: шероховатость, микротвердость и остаточные напряжения стальных изделий.

Задачи:

1. С целью определения рациональных режимов экспериментально исследовать ультразвуковые технологии и ХТО при формировании модифицированного поверхностного слоя изделий при ППД.

2. Для повышения производительности и равномерной обработки ППД нежестких валов разработать способ комбинированной обработки поверхностным пластическим деформированием с использованием ультразвуковых колебаний.

3. Теоретически и экспериментально исследовать специальные УЗКС, обладающие высокими энергетическими характеристиками и позволяющими получать амплитуду смещения инструмента-индентора не менее 15 мкм.

4. Разработать и апробировать на практике технологические рекомендации по реализации комбинированных технологических процессов ППД с ультразвуком и ХТО.

5. Для снижения шероховатости и повышения микротвердости поверхностного слоя нежестких валов разработать совмещенный и комбинированный технологические процессы ППД с ультразвуком.

Методы исследования основаны на теоретических положениях технологии машиностроения и математического моделирования. Экспериментальные исследования УЗО ППД проведены на модернизированном металлорежущем станке 1К625. Шероховатость определяли на контактном высокочувствительном приборе профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр». Износостойкость оценивалась посредством УМТ - 2168 «Унитриб». Оценку твердости производили на твердомере модели ТП-2. Микротвердость на поверхности образцов измерялась на приборе ПМТ-3. Металлографические исследования проведены на микроскопе Neophot-21. Исследования параметров тонкой структуры и оценка остаточных напряжений осуществлялись рентгенографическим методом на установке ДРОН-3.

Достоверность и обоснованность обеспечивалась использованием современного оборудования, стандартной измерительной аппаратуры при проведении экспериментальных исследований и применением математических методов при обработке и анализе экспериментальных данных. Для получения результатов исследования использовалась теоретическая и методологическая база в виде научно-методологического комплекса управления структурообразованием в инженерии поверхности металлов.

Научная новизна

1. Установлено существенное преимущество импульсного по сравнению с традиционным непрерывным способа передачи энергии ультразвуковых колебаний от инструмента-индентора упрочняемой детали, обеспечивающего в 1,5 раза более высокую степень наклепа и уровень остаточных напряжений, а также большую плотность дислокаций и дисперсность блоков, при этом импульсный способ обеспечивается за счет зазора, величина которого

удовлетворяет условию $\xi > \delta \geq 0$ (п. 2, 3 паспорта научной специальности 2.5.5).

2. Установлена связь между величиной амплитуды смещения рабочей части многополуволновых УЗКС и элементами соединения преобразователя с высокими потерями и инструментом с более низкими потерями, выявлены конструктивные особенности их сопряжения и определены рациональные параметры УЗКС, обеспечивающие высокую амплитуду смещения индентора (п. 3, 4, 7 паспорта научной специальности 2.5.5).

3. С целью повышения производительности ультразвукового ППД нежестких валов и равномерного упрочнения по длине детали разработана технология комбинированной обработки ППД с ультразвуком, заключающаяся в использовании одновременно двух инструментов – инденторов, установленных со смещением, кратным $0,5S_{\text{пр}}$, одному из которых сообщаются ультразвуковые колебания (п. 4, 9 паспорта научной специальности 2.5.6).

4. Установлено, что предложенная комбинированная технология обработки ППД, сочетающая ХТО (азотирование) и последующее импульсное ультразвуковое ППД, позволяет повысить поверхностную твердость детали из стали в 1,6 раза, увеличить глубину упрочнения в 2 раза, сгладить перепад показателей твердости на границе азотированного слоя (п. 2, 4, 7 паспорта научной специальности 2.5.6).

Практическая значимость:

1. Разработана методика повышения амплитуды колебаний рабочего торца инструмента-индентора, основанная на подборе элементов связи между низкодобротным преобразователем и высокодобротным инструментом, и обеспечивающая снижение акустических потерь в сочленениях многополуволновой УЗКС.

2. Разработан способ комбинированной обработки ППД с ультразвуком (патент №2794512 от 19 апреля 2023), при котором упрочнение поверхности

вращающейся детали при ППД осуществляется с наложением на инструмент-индентор ультразвуковых колебаний.

3. Определены рациональные режимы комбинированного технологического процесса ППД с использованием ультразвуковых колебаний с целью формирования функциональных свойств поверхностного слоя на сталях с учетом эксплуатационных требований к изделиям.

4. Внедрение разработанной технологии комбинированного технологического процесса ППД с применением ультразвука позволяет получить экономический эффект, который складывается из применения недорогих сталей, сокращения количества операций и повышения производительности технологического оборудования.

На защиту выносятся:

1. Методика создания комбинированных и совмещенных технологических процессов ППД с ультразвуком и ХТО с целью формирования заданных свойств изделий транспортной техники.

2. Результаты экспериментальных исследований комбинированных и совмещенных технологических процессов ППД с ультразвуком и ХТО.

3. Результаты теоретического и экспериментального исследования ультразвуковых стержневых многополуволновых УЗКС, используемых в комбинированных и совмещенных технологических процессах ППД с ультразвуком.

4. Рекомендации по оптимальным режимам технологических процессов комбинированной обработки ППД с ультразвуком.

5. Способ комбинированной обработки длиномерных деталей (патент №2794512 от 19 апреля 2023) ультразвуковым ППД с целью повышения производительности и равномерного поверхностного упрочнения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной конференции молодых ученых «Научное наследие Д.К. Чернова» (г. Москва, 2018г.); XI-ой Международной научно-технической конференции ассоциации

технологов-машиностроителей «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе» (г. Калининград, 2019 г.); XII-ой Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей "Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении (г. Тамбов, 2020 г.); Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (ICMTMTE 2021), объединенная с 3-ем Международным научным симпозиумом «Перспективные технологии аэрокосмической техники» (ТАКТ-2021) (г. Севастополь, 2021 г.); Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2022» (ICMTMTE 2022), объединенная с 4-ым Международным научным симпозиумом «Перспективные технологии аэрокосмической техники (ТАКТ — 2022)» (г. Севастополь, 2022 г.); 14-ой Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (г. Брянск, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, в том числе 5 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, получен 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 135 страницах, содержит 52 рисунка, 14 таблиц, 3 приложения и список литературы из 130 наименований.

Глава 1 ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА И ХТО

1.1. Современное представление о процессах повышения долговечности деталей машин

В современном машиностроении и смежных областях металлообрабатывающей промышленности значительное внимание уделяется решению задач, связанных с повышенными требованиями к эксплуатационным характеристикам материалов. Эти требования обусловлены более высокими механическими нагрузками на детали машин и одновременным стремлением снизить их массу. Основная цель - повысить надежность и срок службы деталей машин и механизмов.

Для снижения затрат на ремонт и потребности в запасных частях важно обеспечить долговечность и надежность элементов машин и конструкций. Надежность промышленных изделий, включая машины, механизмы и устройства, зависит от характеристик их составных частей и сборки. Эти характеристики в основном связаны с используемыми материалами. На надежность и долговечность оборудования существенное влияние оказывают такие параметры, как статическая и динамическая прочность, устойчивость к разрушению при хрупкости, износостойкость, устойчивость к разрушению, вызванному усталостью, и другие характеристики материалов. Важно обеспечить учет этих характеристик при проектировании и производстве в машиностроении.

Чтобы решить проблему долговечности, можно не только добавлять легирующие элементы в материалы деталей, но и использовать технологические методы для целенаправленного изменения физических, механических и других свойств поверхностных слоев деталей [1]. Этого можно достичь с минимальными материальными и энергетическими затратами.

В современной машиностроительной отрасли существует множество методов улучшения свойств деталей и повышения их эксплуатационной надежности [2]. Методы поверхностного пластического деформирования (ППД), включая методы финишной обработки и упрочнения, широко применяются для улучшения эксплуатационных характеристик материалов деталей. Применение этих методов позволяет при небольших затратах повысить усталостную прочность, износостойкость и контактную выносливость деталей [3]. Метод ППД позволяет получить высокий класс чистоты поверхности, создать в поверхностных слоях остаточные напряжения сжатия, высокую твердость, получить значительно большую опорную поверхность [4].

Внедрение модернизированных известных, а также разработка новых способов, позволяющих полнее использовать резервы, заложенные в материалах, является актуальной задачей в технологии машиностроения.

В настоящее время известны различные способы поверхностного пластического деформирования [5]. Среди них привлекает внимание способ, основанный на использовании энергии ультразвуковых колебаний [6]. Способ имеет определенную область применения, обусловленную прежде всего конструктивными особенностями упрочняемых деталей, где использование других способов ППД затруднено и нецелесообразно.

Упрочнение как ультразвуковое, так и вибрационное на основе энергии колебаний в отличие от других способов ППД сопровождаются небольшими по величине силами, что позволяет с достаточно высокой точностью обрабатывать цилиндрические поверхности деталей, не отличающихся большой жесткостью и не требующих дополнительных условий к их установке и закреплению при обработке.

Технологии поверхностного модифицирования конкретных деталей включают несколько этапов инженерии поверхности [7], среди которых подготовка поверхности изделия к модификации, непосредственно процесс

получения покрытия, при необходимости – заключительная финишная обработка.

В традиционном производстве задачи отдельных этапов инженерии поверхности, как правило, решаются отдельно. Комбинированные технологии ППД и ХТО с применением ультразвука позволяют интегрировать в единый процесс контроль структуры на всех этапах получения градиентных покрытий: от подготовки поверхности изделия к модифицированию до ее финишной обработки. При этом необходимо комплексное регулирование заданного структурного состояния на разных уровнях: на микроуровне (рельеф и шероховатость поверхности, фазовые и структурные превращения), на субмикро- и наноуровне (изменения дислокационной структуры и субструктуры, внутренних напряжений), и, соответственно, достижение требуемых эксплуатационных свойств детали на макроуровне. Для реализации этой задачи требуются масштабные теоретические и экспериментальные исследования взаимного влияния процессов ХТО и ультразвуковой обработки на структурные и фазовые изменения в поверхностном слое стали на основе актуальных достижений физики металлов. На сегодняшний день разработаны научные основы механизмов воздействия этих процессов на металл [8]. Значительный вклад в теорию и практику применения ППД внесли представители известных отечественных научных школ электрофизических методов и химико-термической обработки: Розенберг Л.Д., Казанцев В.Ф., Кулемин А.В., Бернштейн М.Л., Лахтин Ю.М., Статников Е.Ш., Смоленцев В.П., Марков А.И., Панов А.П., Агранат Б.А., Муханов И.Н., Абрамов О.В., Макаров А.И., Худобин Л.В., Приходько В.М., Киселев Е.С. и др. Работы вышеупомянутых авторов определили основные направления исследования.

Исследования применения ультразвука при термической и химико-термической обработке активно проводились в 60-е – 70-е годы прошлого века, но они не создали методологической платформы для реализации комбинированных технологий, решали конкретные прикладные задачи и не приобрели должного масштаба. Причиной этого можно считать недостаточное

развитие научного обоснования комплексного воздействия ультразвуковых и диффузионных процессов на тонкое строение металла. В настоящее время отсутствуют теоретические модели и детальные экспериментальные исследования, на которые можно было бы опереться при разработке эффективных комбинированных технологий поверхностного модифицирования, сочетающих как ультразвуковую обработку, так и ХТО.

Исследованию этих способов упрочнения и посвящена настоящая диссертационная работа.

1.2. Особенности поверхностного пластического деформирования

Основной тенденцией в поисках надежности конструкции является не только выбор материала и совершенное проектирование, но и технологическое обеспечение надежности машин и конструкций. Использование рациональных технологических приемов позволяет максимально эффективно использовать присущие металлическим материалам физико-механические и другие свойства, при этом минимизируя затраты как материальных ресурсов, так и энергопотребления [9].

Большинство исследований по упрочнению изделий и практическое использование их результатов направлено на ликвидацию дефектов в деталях, полученных по несовершенной технологии. Обзор этих исследований [10, 11] показывает, что наиболее доступным и эффективным воздействием на улучшение физико-механических свойств металла является устранение поверхностных дефектов в металле.

Повышение требований к деталям по долговечности и эксплуатационной надежности, от которых зависит работа машин и конструкций в целом и производительность труда, вынуждает исследовать, разрабатывать и применять дополнительные технологические мероприятия по упрочнению и повышению физико-механических характеристик деталей.

Исследования в области повышения надежности и долговечности деталей и механизмов машин [12] привели к значительному прорыву в этой

области в середине XX века, который сконцентрировал внимание исследователей на важности поверхностного слоя в металлических объектах, установив, что он является критическим фактором их эксплуатационной прочности. Было установлено, что повышение характеристик именно поверхностного слоя является хорошим способом повышения надежности и долговечности конечного продукта [13]. Это означает, что разработка новых материалов и сплавов с помощью дорогостоящих процедур легирования не всегда необходима для повышения прочности металла. Значительных успехов можно добиться, целенаправленно изменяя поверхностный слой металла. Это включает в себя изменение его структуры, упругости и внешней микрогеометрии [4].

Одним из важнейших и высокоэффективных путей решения проблемы повышения работоспособности, надежности и долговечности машин является внедрение в машиностроительную практику упрочняющей и отделочно-упрочняющей обработки поверхностных слоев деталей. Отделочно-упрочняющая обработка, осуществляемая методами ППД, часто является завершающей операцией в технологическом цикле изготовления деталей; в ряде случаев она успешно заменяет такие традиционные способы финишной обработки, как шлифование, хонингование, притирка, суперфиниширование, которые имеют широкое применение. Вместе с тем, обеспечивая высокие точности геометрических параметров, например, шлифование с позиции качества формируемой поверхности имеет и недостатки. Если не касаться шаржирования абразивом обрабатываемой при шлифовании поверхности [14], то и создаваемые физико-механические свойства и параметры микропрофиля не являются оптимальными с позиции эксплуатационных требований [14].

Часто после термической обработки конечной операцией при изготовлении деталей является шлифование, оказывающее значительное не всегда положительное влияние на качество поверхностного слоя и резко изменяющее структуру, полученную при термической обработке [15].

Главной причиной этого изменения является интенсивное тепловыделение, т.к. основная часть работы, затраченная на процесс шлифования, преобразуется в тепло. Тепло вызывает фазовые и структурные изменения, которые связаны с изменением удельного веса и объема в поверхностных слоях с образованием остаточных напряжений, сопровождаемое в некоторых случаях возникновением трещин. Шлифовочные трещины являются, как правило, следствием растягивающих напряжений поверхностных слоев [16].

По данным А.И. Куюна [17] при шлифовании термически обработанной стали У8А (HRC 59-62) температура шлифования достигается 870°C в точке на расстоянии 20-30 мкм от поверхности. Скорость нагрева тонкого поверхностного слоя превышает 4500 град/сек, а скорость охлаждения 2500 град/сек. [17]. Изменения структуры закаленной стали, в основном, зависят от температуры нагрева при шлифовании, выдержки при достигнутой температуре, химического состава стали и ее термической обработки до шлифования [17]. Когда температура нагрева превышает точку A_{c1-3} , а скорость охлаждения больше критической скорости закалки, зона высокого нагрева вторично закаливается с образованием структуры аустенита-мартенсита и тростита отпуска. Если нагрев не превышает A_{c1} , сталь отпускается и структура ожогов представляет собой продукты распада мартенсита (тростит и тросто-мартенсит).

В работе В.А. Ланда [18] показано, что в углеродистых и малолегированных сталях исправление прижогов термической обработки невозможно из-за наличия в них отпущенных слоев малой твердости и их большей толщины. Легированные стали, обладающие высокой теплоустойчивостью структуры мартенсита, имеют минимальную глубину и развитие отпущенного слоя; углеродистые стали, имеющие весьма неустойчивое состояние мартенсита отпуска, в отшлифованном состоянии под вторично-закаленным слоем, имеют сильно отпущенный слой металла с увеличенной глубиной. Глубина шлифованных ожогов может быть 4-5 мм.

В работе [19] показано, что тепло, выделяющееся при шлифовании, оказывает на шлифуемую поверхность одновременно упрочняющее и разупрочняющее действие.

В работе [20] указывается на возможность выбора рациональных режимов шлифования, при которых в приповерхностном слое создаются благоприятные по знаку остаточные напряжения, соизмеримые с напряжением, возникающими при упрочняющей технологии [20]. Однако, при шлифовании высокоуглеродистых сталей с обычными скоростями возникают остаточные напряжения растяжения, а при скоростном шлифовании возможно повышение как напряжения растяжения, так и сжатия. В слое с максимальными растягивающими напряжениями и пониженной твердостью возникают трещины, которые стремятся выйти на поверхность, но им препятствует слой вторичной закалки, который находится под действием значительных сжимающих напряжений. Если поверхностный слой, упрочненный сжимающими напряжениями тонкий, то растягивающие напряжения разрывают его и трещины выходят на поверхность.

Увеличение числа проходов приводит к уменьшению величины и глубины залегания сжимающих остаточных напряжений, вследствие постепенного снятия верхнего слоя повышенной твердости и приближение к поверхности отпущенной зоны; число проходов свидетельствует о влиянии на качество поверхности. Таким образом, шлифование закаленной стали приводит к значительным изменениям приповерхностных слоев деталей машин: появляются неровности от абразивных зерен, вызывающие концентрацию напряжений, а нагрев обрабатываемого материала, всегда сопровождающий механическую обработку, может вызывать фазовые превращения, распространяющиеся на значительную глубину [21].

Шлифование является тонким технологическим процессом, и незначительные отклонения от правильного режима могут привести к возникновению трещин после шлифовки, вызванных появлением значительных растягивающих напряжений [22].

Таким образом, в результате операции шлифования поверхностные слои деталей машин часто получают отрицательные характеристики качества поверхностного слоя и оказываются ослабленными, в то время как они должны нести главную нагрузку в процессе эксплуатации.

Одним из важнейших и высоко эффективных путей решения проблемы повышения работоспособности, надежности и долговечности машин является внедрение в машиностроительную практику упрочняющей и отделочно-упрочняющей обработки поверхностных слоев деталей. Отделочно-упрочняющая обработка, осуществляемая методом ППД, часто является завершающей операцией в технологическом цикле изготовления деталей [22].

Технология ППД предполагает приложение заданного усилия к обрабатываемой поверхности с помощью инструмента [23], вызывающего пластическую деформацию в поверхностном слое. Этот процесс охватывает всю обрабатываемую поверхность по мере прохождения инструмента. На рисунке 1.1 показано, как происходит пластическая деформация поверхности при механической обработке. Обрабатываемая поверхность обозначена цифрой 1, а инструмент, используемый в процессе обработки, - цифрой 2.

Главное преимущество отделочно-упрочняющей обработки ППД состоит в том, что одновременно с сообщением обрабатываемой поверхности детали заданного микрорельефа происходит упрочнение поверхностного слоя, в котором при этом создаются остаточные напряжения сжатия. В результате упрочнения существенно улучшаются такие эксплуатационные свойства деталей, как усталостная прочность, контактная выносливость, износостойкость, противозадирная и коррозионная стойкость [24].

За последние годы [24] разработано большое количество самых разнообразных способов упрочнения и обработки ППД, позволяющих значительно повысить усталостную прочность, износостойкость, коррозионную стойкость и т.д.

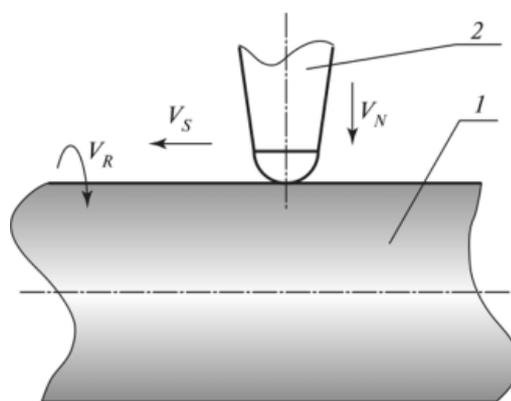


Рис. 1.1. Принципиальная схема поверхностного пластического деформирования [5]

Российские ученые (см. стр. 12) разработали технологии механической обработки, позволяющие точно контролировать качество поверхности в широком диапазоне показателей, характеризующих его. Сложные условия работы изделий современного машиностроения привели к появлению множества технологий, зачастую требующих их комбинированного применения в силу многогранности требований, предъявляемых к продукции.

Внедрение упрочняющей и упрочняюще-отделочной обработки ППД не только обеспечивает значительную экономию дефицитных легирующих элементов (в ряде случаев становится возможной замена высоколегированных сталей малолегированными или углеродистыми см. табл. 1.1), но и дает значительный эффект за счет повышения долговечности в эксплуатации упрочненных деталей. [25-28].

Таблица 1.1

Примеры замены марок сталей после упрочнения ППД [25]

Упрочняемая деталь	Марки сталей		Годовая выгода тыс./руб.
	без упрочнения	после упрочнения	
Валы механизма передвижения грейферной тележки угольного перегружателя	40ХН	40Х	20
Ось шахтных электровозов	40ХН	45	7,5

Шестерни борторедукторов	20ХНЗА	45	-
-----------------------------	--------	----	---

Методы ППД широко изучаются и непрерывно совершенствуются. Созданы многочисленные установки, приспособления и инструменты применительно к различным практическим условиям. Успешно применяются дробеструйные установки, устройства для обкатки деталей роликами и шариками, дорны и раскатки, гидроабразивные и гидродробеструйные устройства, целый ряд устройств ударного действия с пневматическим или механическим способом нагружения [29].

1.3. Поверхностное пластическое деформирование с ультразвуком

Одним из методов поверхностного пластического деформирования, предназначенным для улучшения эксплуатационных свойств при обработке ответственных изделий, является поверхностное упрочнение с использованием ультразвука [30]. Ультразвуковая технология, как технологическое направление, объединяет в себе процессы воздействия ультразвука на различные вещества.

Ультразвуковые технологии широко используются в основных и восстановительных производственных процессах в различных областях, особенно в точном машиностроении и приборостроении. Ультразвук все чаще используется в транспортном машиностроении для повышения надежности ответственных деталей и узлов [31-33].

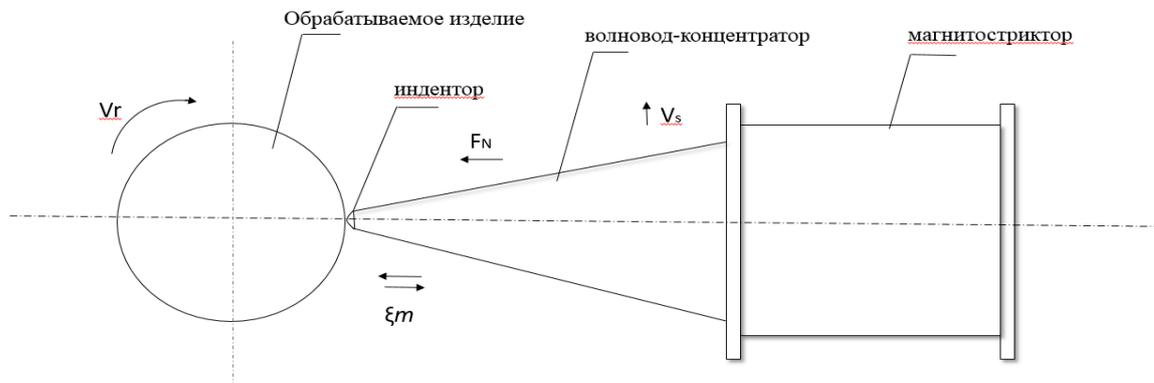


Рис. 1.2. Принципиальная схема поверхностного пластического деформирования с наложением ультразвуковых колебаний

В 1964 году И.И. Муханов [34, 35] опубликовал первые работы по ППД с использованием ультразвукового инструмента-индентора. В отличие от традиционных методов выглаживания, ультразвуковой инструмент-индентор, используемый в ППД, колеблется с частотой 18 кГц и выше, причем его колебания поляризованы перпендикулярно поверхности заготовки, предназначенной для обработки (см. рис. 1.2). В процессе обработки инструмент прижимается к поверхности заготовки с постоянной силой F_N и перемещается вдоль поверхности со скоростью V_S , вращающейся заготовки со скоростью V_R .

Когда колебательные смещения малы, происходит пластическая деформация, обусловленная средними статическими напряжениями и амплитудой периодических напряжений в зоне контакта во время гармонических колебаний инструмента. Когда амплитуда превышает некоторый критический порог [34], процесс ППД переходит из гармонического режима в ударный. В определенный момент цикла колебаний инструмент отрывается от обрабатываемой поверхности. Однако при повторном соударении уровни напряжений превышают средние пороговые значения, вызывая значительно усиленную пластическую деформацию по сравнению с обычными методами выглаживания [35].

Отличительной особенностью ультразвукового ППД является возникновение повышенных импульсных механических напряжений на фоне сравнительно более низких средних напряжений. Дополнительное возвратно-поступательное движение инструмента вдоль обрабатываемой поверхности повышает равномерность процесса обработки [34, 35].

Ультразвуковые технологии ППД можно классифицировать следующим образом:

- ультразвуковое выглаживание: этот метод предполагает обработку под постоянной силой прижима в системе "обрабатываемая поверхность - деформирующий элемент - ультразвуковая колебательная система";

- ультразвуковое воздействие с зазором – метод, при котором обработка происходит при наличии зазора (отсутствие постоянного давления) в системе "обрабатываемая поверхность - деформирующий элемент - ультразвуковая колебательная система", когда $\xi_m > \delta \geq 0$, как показано на рис. 1.3 [36].

Импульсная, в свою очередь подразделяется на установку инструмента с зазором, к обрабатываемой поверхности или с пружиной.

Наиболее часто используемая технология - ультразвуковое выглаживание, - представляет собой финишный метод обработки деталей с правильной геометрической формой и начальным уровнем шероховатости $Ra = 2,48...1,98$ мкм (в случае стали). Этот параметр шероховатости указывает на качество поверхности, достигнутое в результате предшествующих технологических операций [28].

Использование ультразвуковых инструментов для упрочняющей обработки позволяет уменьшить дефекты в поверхностном слое, вызванные предыдущими операциями, или их исключить, в том числе и шлифование. Этот метод упрочняет слой, создает сжимающие остаточные микронапряжения и значительно повышает долговечность деталей [37].

На рис. 1.3 показана принципиальная схема упрочняющей обработки с использованием ультразвуковых инструментов, а на рис. 1.4 - практическая реализация ультразвуковой обработки наружной цилиндрической поверхности [38].

Ультразвуковой инструмент, обозначенный как 10, работает, используя как статические, так и усиленные динамические силы, создаваемые колебательной системой. Эта система состоит из ультразвукового генератора (1), магнитострикционного преобразователя (5) и концентратора (9), которые вместе оказывают значительное динамическое воздействие на поверхностный слой (11) заготовки. В результате этого воздействия слой, который ранее был срезан или отшлифован, подвергается пластической деформации, что повышает его твердость и устраняет неровности поверхности. Статическая

сила, обозначенная F_N , создается пружинным механизмом (7), который перемещается по направляющим (6).

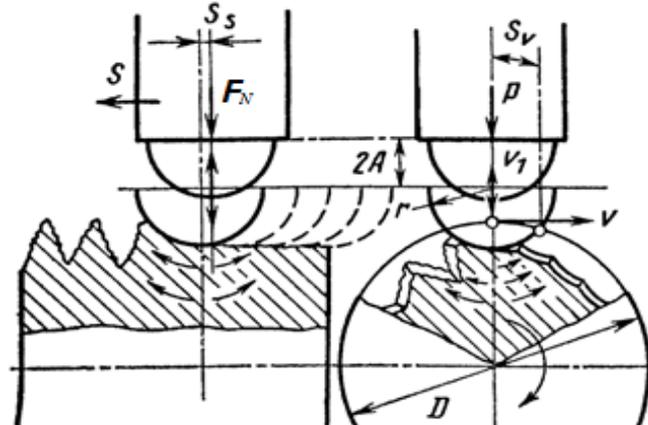


Рис. 1.3. Схема упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом (УЗО)

P - динамическая сила; F_N - статическая сила;

ξ_m - амплитуда смещения рабочей части инструмента;

S - продольная подача; S_v - относительная подача за один период колебаний;

V - окружная скорость заготовки; V_1 - колебательная скорость рабочей части инструмента;

D - диаметр обрабатываемой детали (заготовки)

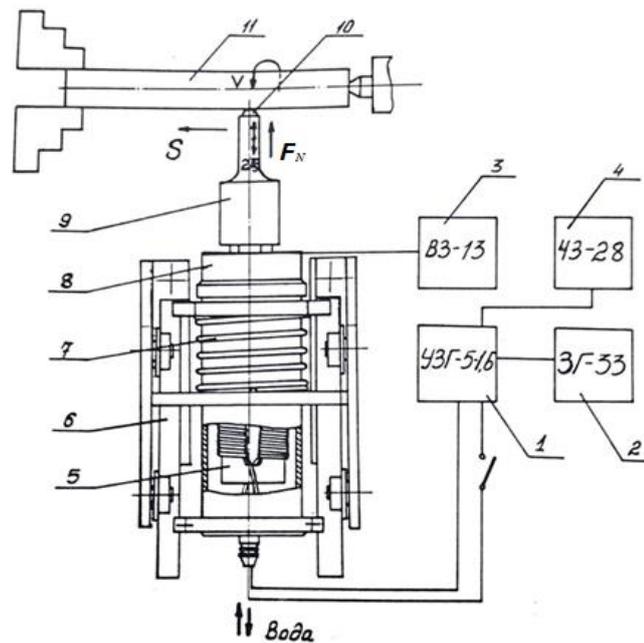


Рис. 1.4. Ультразвуковое упрочнение наружной цилиндрической поверхности:

1- ультразвуковой генератор УЗГ – 5-1,6; 2-задающий генератор ЗГ-33;

3 - милливольтметр ВЗ -13; 4 – частотомер ЧЗ -28;

5 – магнитострикционный преобразователь;

6 – направляющие; 7 – пружина для создания статической силы;

8 – электродинамический датчик для измерения амплитуды ξ_m ;

9 – излучатель; 10- рабочая часть ультразвукового инструмента;

11 – обрабатываемая деталь

Показатели качества, определяющие характеристики поверхностного слоя, тонкую структуру и эксплуатационные свойства при ультразвуковой ППД, зависят от целого ряда факторов [34], в том числе от силы прижима F_N , амплитуды колебаний инструмента, радиуса вершины r инструмента, частоты колебаний f , продольной подачи S , количества проходов i , скорости вращения детали V , диаметра детали D и начальной шероховатости.

Напряженно-деформированное состояние поверхности после УЗО создает уникальные характеристики из-за высоких напряжений и повторяющейся нагрузки [34]. Сложный механизм множественных проскальзываний в этом процессе еще больше затрудняет подвижность дислокаций, приводя к увеличению плотности дислокаций и дисперсии блоков по сравнению с методами прокатки шариков [34]. В результате уровни захвата увеличиваются в 1,2-1,5 раза, что приводит к более высокому остаточному напряжению сжатия по сравнению с теми, которые возникают в процессе прокатки шариков [34].

Когда ультразвуковая обработка выполняется непрерывно, значительное количество энергии передается в виде потенциальной энергии, вызывая искажение решетки и способствуя накоплению скрытой энергии деформации. По сравнению со статическими методами, такими как прокатка шариков, использование УЗО приводит к более высокому уровню упрочнения поверхностного слоя. Это связано с высокоскоростными процессами деформации ($\dot{\epsilon} = 1400$ 1/с и выше) [38]. Скорость деформации на несколько порядков выше, чем при статическом методе ППД. В результате такая быстрая деформация сжимает все шероховатости поверхности, образовавшиеся в результате предыдущих обработок, создает наклепанный слой и образует остаточные макронапряжения, вызывающие сжатие.

Ультразвуковое упрочнение ППД может значительно повысить износостойкость и долговечность деталей, часто в 2-5 раз [39]. Например, при ультразвуковом упрочнении цапг и втулок из стали ШХ15 в шариковых

направляющих для вырубных штампов с достижением твердости HRC 62-64 износостойкость увеличилась в 4,7 раза.

При сравнении метода ППД с применением ультразвука и без, в частности с прокаткой шариками, имеются заметные различия, описанные в [40]:

1. Инструмент-индентор УЗКС подвергает поверхностный слой детали пульсирующей пластической деформации, увеличивая интенсивность вибрации.

2. Инструмент многократно деформирует сегмент поверхности заготовки толщиной 1 мм² с частотой, в 400 раз превышающей частоту, используемую при прокатке шариков.

3. Во время процесса УЗО инструмент вызывает периодическое и интенсивное трение скольжения по поверхности заготовки.

4. Статическая сила, действующая на заготовку, незначительна.

5. Скорость деформации колеблется и иногда может достигать 200 м/мин или выше.

6. Под воздействием нормальной направленной силы среднее давление в поверхностном слое заготовки увеличивается в 3-9 раз по сравнению с уровнями, наблюдаемыми при обкатывании шаром.

7. Температура в зоне деформирования вследствие больших нормальных и тангенциальных сил достигает 660°C, а в процессе обкатывания только 100-150 °C.

8. При УЗО создаются относительно большие остаточные сжимающие микронапряжения.

9. Процесс УЗО наиболее эффективен при обработке деталей из закаленных высокоуглеродистых сталей, отпущенных на различные структуры: мартенситную, троститную, сорбитную. В результате УЗО у деталей с мартенситной структурой микротвердость возрастает на 34%. Этот факт – следствие упрочнения, вызванного пластическим деформированием,

частичным превращением остаточного аустенита в мартенсит и дисперсным твердением мартенсита.

10. По геометрическому состоянию поверхности после УЗО создается характерный микрорельеф, способствующий лучшему удержанию смазки.

При упрочнении незакаленных сталей микрорельеф поверхности улучшается на четыре-пять классов, остаточные напряжения сжатия достигают 110 кгс/мм², а глубина наклепа – до 1,2 мм, поверхностная твердость возрастает на 80-100% [38].

1.4. Влияние ультразвуковой обработки на свойства поверхностного слоя

Методы упрочения ППД базируются на управлении дислокационной структуры путем механического воздействия на обрабатываемый объект.

Анализ литературных данных по влиянию ультразвуковой обработки на физико-механические свойства металлов и сплавов [41-44] показали, что при воздействии ультразвука на металлы и сплавы возможны различные структурные изменения, оказывающие влияние на их свойства.

В основе процесса обработки металлов давлением при воздействии ультразвуковых колебаний, лежит ряд сложных физических явлений, которые можно разделить на две группы.

1. Явления, связанное с воздействием вибрирующего инструмента локально в очаг деформации обрабатываемой поверхности детали, влекут неоднородный нагрев материала вследствие поглощения ультразвуковой энергии.

2. Явления, вызванные ультразвуковым воздействием, которые приводят к изменению механических характеристик заготовки и ускоряют диффузионные превращения.

Воздействие ультразвука на свойства поверхности металлов и сплавов зависит от исходных условий и параметров обработки, таких как мощность, частота и амплитуда колебаний. Акустическая мощность непосредственно

характеризует эффекты, связанные с выделением тепла и повышением температуры тела в результате обработки ультразвуком. Однако результаты, в основном, определяются амплитудой колебательных смещений, создаваемых инструментом-индентором. Снижение коэффициента трения в значительной степени зависит также от амплитуды колебательных смещений.

В проведенных исследованиях [45, 46] показано, что ультразвуковая обработка отожженных металлов может приводить к их упрочнению при определенных режимах обработки; показано, что ультразвуковая обработка на частоте 20 кГц с амплитудой $\xi_m = 3 \dots 5$ мкм (за несколько минут), не повышает предел прочности; увеличение же амплитуды ультразвуковых колебаний до 15...20 мкм (в течении нескольких секунд) приводит к увеличению предела прочности на 7,3%, предел текучести возрастает в 3 раза. Причем, при достижении максимального упрочнения начинается процесс разупрочнения. Результаты вышеприведенных экспериментов показали, что упрочнение металлов носит пороговый характер и зависит от вводимой в металл энергии. Такая зависимость упрочнения указывает на его дислокационный механизм.

Температура, при которой производится импульсная обработка с помощью ультразвукового инструмента в диапазоне 700...800 °С, может также оказывать существенное влияние, что и отмечается в ряде работ [46]. В тоже время в литературе практически не приводятся результаты по исследованию влияния импульсного воздействия на металлы и сплавы при температурах 200...300 °С. Так, при импульсной обработке с помощью ультразвукового инструмента-индентора углеродистых закаленных сталей при температуре 200...300 °С может повышаться износостойкость сталей за счет образования отпущенного мартенсита и блочной структуры металла, хотя и возможно небольшое снижение микротвердости [45]. Здесь важно выбрать оптимальную амплитуду и температуру для ультразвуковой обработки.

1.5. Химико-термическая обработка с ультразвуком

Ультразвуковая обработка (УЗО) и химико-термическая обработка (ХТО) являются широко используемыми методами улучшения свойств поверхности изделия [47, 48]. Сочетание двух методов ультразвуковой обработки и ХТО обеспечивает синергетические преимущества за счет использования технологических особенностей каждого из них и получения дополнительных положительных эффектов за счет одновременного применения.

Традиционно поверхность стали насыщается определенными элементами, такими как углерод, азот, алюминий и хром, путем химической и термической обработки. Это достигается за счет диффузии из внешней среды при повышенных температурах.

В работе [49] этот процесс характеризуется тремя основными этапами:

- диссоциация - процесс перехода диффундирующего элемента в атомарное состояние в насыщающей среде посредством химических реакций;
- адсорбция - контакт между атомами диффундирующего элемента и поверхностью металла, приводящий к образованию химических связей с атомами металла;
- диффузия - миграция атомов насыщающего элемента вглубь металлической подложки.

Диффузия в твердой фазе обычно сдерживает процесс насыщения, определяя скорость формирования диффузионного слоя. Этот слой, отличный от исходного материала, различается по химическому составу, структуре и свойствам. Толщина диффузионного слоя зависит от продолжительности процесса насыщения, температуры и концентрации диффундирующего элемента в насыщающей среде.

Наиболее известными методами диффузионного насыщения поверхности металла являются цементация, нитроцементация, цианирование

и азотирование. В настоящее время основное внимание уделяется сочетанию азотирования с ультразвуковой обработкой [50, 51].

Азотирование — это процесс, при котором азот диффундирует в поверхностный слой металлов для повышения твердости, износостойкости поверхности, выносливости и коррозионной стойкости в различных условиях окружающей среды.

Использование ультразвуковых волн при обработке жидкостей оказывает значительное влияние на результаты ХТО. Это часто приводит к эффектам, которые не могут быть достигнуты в обычных условиях без использования ультразвука [52, 53].

Ультразвуковые колебания могут ускорить процесс насыщения за счет усиления поглощения активных атомов насыщающего вещества поверхностью обрабатываемого изделия. Это потенциально может увеличить концентрацию вещества на поверхности. Однако в настоящее время нет экспериментальных данных, непосредственно подтверждающих это предположение.

Большинство исследователей считают [54, 55], что ультразвуковые колебания ускоряют диффузионные процессы, управляющие переносом атомов в слое, что приводит к сокращению длительности цикла насыщения и увеличению глубины слоя.

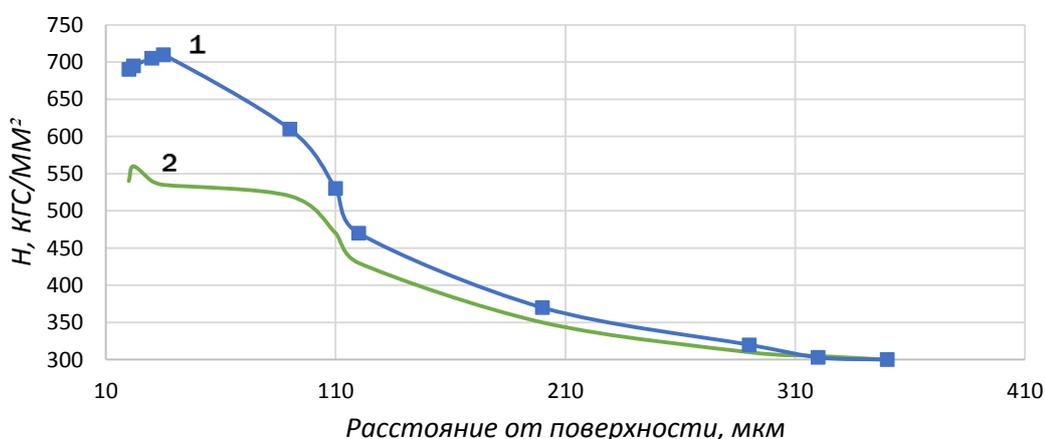


Рис. 1.5. Распределение твердости по глубине азотированного слоя стали 35ХЮА при жидкостном азотировании [55]: 1 — с ультразвуком; 2 — без ультразвука

В исследовании, описанном в [55-57], изучалось влияние ультразвуковых колебаний на процесс азотирования стали 35ХСА как в газовой, так и в жидкой средах. Эксперимент заключался в прикреплении образцов к волноводу для непрерывной передачи ультразвуковых колебаний через слой расплавленной соли с частотой 20-22 кГц. Процедуры азотирования проводились в расплаве, состоящем из 31% BaCl₂, 48% CaCl₂ и 21% NaCl, с пропусканием через него аммиака, при температурах в диапазоне от 540 до 560 °С в течение от 2 до 12 часов.

Исследование выявило несколько важных закономерностей. Процесс жидкого азотирования был ускорен ультразвуковой обработкой в нейтральной ванне с циркуляцией аммиака. На рис. 1.5 показано увеличение глубины слоя и микротвердости в азотированном слое.

Газовое азотирование приводит к повышению микротвердости при непосредственной передаче ультразвуковых колебаний обрабатываемому образцу по сравнению с установками жидкостного термоультразвукового азотирования.

Анализ экспериментальных данных [55] показывает, что ультразвуковые колебания ускоряют диффузию за счет двух основных процессов:

- 1) ультразвуковые колебания увеличивают концентрацию вакансий в твердом растворе, что влияет на взаимодействие и подвижность дислокаций в металлической матрице. В этом случае, ультразвуковые колебания оказывают особое влияние на сложную структуру металлов.

- 2) ультразвуковые колебания увеличивают концентрацию вакансий в твердом растворе, что влияет на взаимодействие и подвижность дислокаций в металлической матрице. Повышение плотности дислокаций происходит потому, что дислокации могут поглощать энергию ультразвуковых колебаний. Это может создавать дополнительные "дислокационные трубки", которые облегчают перемещение атомов, потенциально ускоряя диффузию внедренных атомов.

3) Формирование структур напряжений в обрабатываемом металле создает направленные потоки вакансий и атомов, которые вносят значительный вклад в движение и распределение вещества внутри материала.

Многие авторы исследований по данной тематике отмечают, [49, 50] что насыщение поверхностного слоя металлов при ХТО в значительной степени зависит от интенсивности воздействия ультразвука. Вместе с тем в просмотренной литературе мы не нашли результатов прямых исследований зависимости характеристик ХТО от такого фактора как удельная акустическая мощность $N_{уд}$ или от амплитуды смещения излучателя ультразвуковых колебаний ξ .

1.6. Магнитострикционные и пьезокерамические преобразователи для ультразвуковых технологий

Основным фактором, определяющим технологический процесс упрочнения с ультразвуком, является амплитуда колебаний на рабочем конце инструмента [31, 58-61]. Величина ξ_m определяется типом, конструкцией и материалом преобразователя. Как правило, в ультразвуковой технологии используются магнитострикционные сплавы и пьезокерамические материалы. Методы расчета характеристик ферритовых преобразователей аналогичны расчету магнитострикционных преобразователей, а прочностные свойства у них такие же, как у пьезокерамических.

В настоящее время конструкции стержневого магнитострикционного и пьезокерамического преобразователей достаточно хорошо отработаны [62]. Технологии их изготовления излагаются в ряде других работ [63, 64].

Магнитострикционный преобразователь (рис. 1.6) представляет собой набор О-образных пластин. Средняя часть пластин называется ножками, крайние – накладками. Нижняя часть пакета припаивается к волноводу. На ножки наматывается обмотка, концы которой присоединяются к генератору. Толщина пакета, как правило, равна ширине пластин. Основными геометрическими параметрами являются высота накладок l_1 , и отношение

площадей поперечного сечения в средней части l_2 и на конце $q = S_2/S_1$. Длина средней части вычисляется из условия резонанса

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} = q, \quad (1.1)$$

Где $\alpha_{1,2} = \frac{2\pi f}{c} l_{1,2}$, c – скорость звука в материале преобразователя.

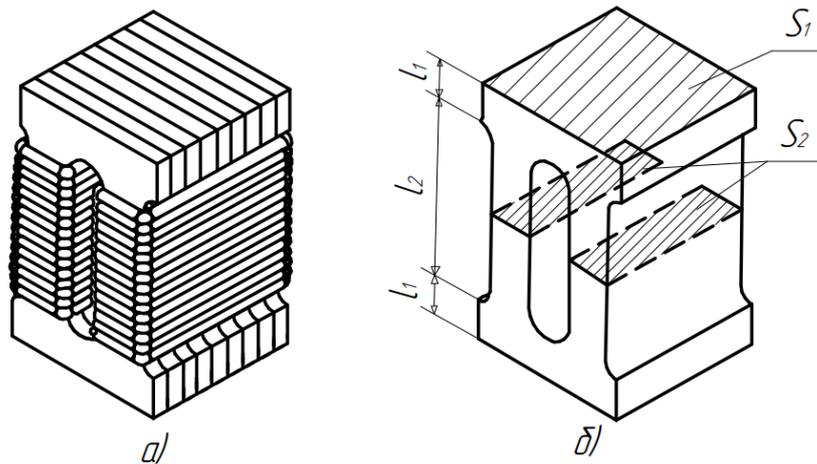


Рис. 1.6. Магнитострикционный преобразователь: а – общий вид; б – схема расчета

Как для магнитострикционного, так и пьезоэлектрического преобразователя, связь между вынуждающей силой F_m и амплитудой колебательной скорости v_m записывается в следующем виде:

$$v_m = \frac{F_m}{R_H^1 + R_{МП}}, \quad (1.2)$$

где R_H^1 – приведенное сопротивление нагрузки, $R_{МП}$ – сопротивление механических потерь, приведенное к тому же (выходному) сечению.

Для магнитострикционного преобразователя несложно получить базовые соотношения

$$F_m = (\xi_M)_m S_{1q}^{-1} \cos \alpha_1, \quad (1.3)$$

$$R_{МП} = \frac{pcS_1}{Q} \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2q} (\cos^2 \alpha_q + q^2 \sin^2 \alpha_1) \right], \quad (1.4)$$

$$a_2 = \arctg(qctg \alpha_1). \quad (1.5)$$

Здесь ρ_c – волновое сопротивление материала преобразователя, ε – коэффициент потерь в этом материале, $(\xi_M)_m$ – амплитуда магнитоэлектрических напряжений, $\alpha_1 = \frac{2\pi f}{c} l_1$ – волновая длина накладки.

Амплитуда магнитоэлектрических напряжений $(\xi_M)_m$ является функцией амплитуды магнитной индукции B_m , создаваемой обмоткой преобразователя. На рис. 1.7 приведена обобщенная зависимость $(\xi_M)_m$

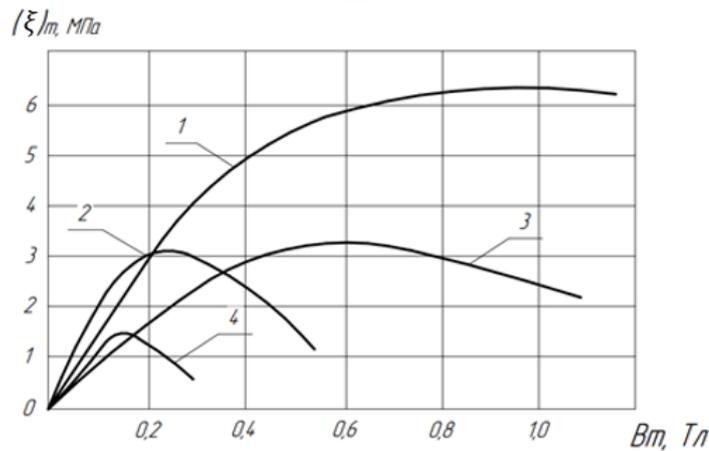


Рис. 1.7. Зависимость амплитуды магнитоэлектрических напряжений $(\xi_M)_m$ от амплитуды индукции B_m : 1 – 50КФ; 2 – Ю14; 3 – Н1; 4 – 21СПА

от величины B_m для разных магнитоэлектрических материалов [65, 66]. Как видно из графика, для любого из материалов существует предельное значение амплитуды магнитоэлектрических напряжений $(\xi_M)_{max}$; этой величине соответствует определенное значение B_m , близкое к $0,5 B_s$, где B_s – индукция насыщения. Для расчетов при условии $B_m < 0,5 B_s$ функциональная зависимость $\xi_M(B)$ может быть представлена в виде

$$(\xi_M)_m = \lambda_{эф} * B_m. \quad (1.6)$$

Здесь $\lambda_{эф}$ – эффективное значение магнитоэлектрической константы.

Амплитуды магнитной индукции и напряжения на концах обмотки связаны следующим соотношением:

$$\omega B_m \frac{S_2}{2} N = U_m, \quad (1.7)$$

где N – число витков обмотки.

Подставляя в (1.7) $B_m = 0,5B_s$, получим максимальное значение напряжения на входе преобразователя, которому соответствует предельная амплитуда магнитострикционных напряжений $(\xi_M)_{max}$. Это напряжение вычисляется по формуле

$$U_{max} = \frac{1}{4} \omega S_2 N B_s. \quad (1.8)$$

При амплитуде электрического напряжения на входе преобразователя $U_m < U_{max}$, используя приведенные выше соотношения (1.6) и (1.7) и подставляя их в формулы (1.2) и (1.3), получим

$$\xi_{вх} = \frac{AU_m}{\omega(R_H^1 + R_{МП})}. \quad (1.9)$$

Здесь

$$A = 2\lambda_{ЭФ} \frac{\cos a_1}{\omega N}. \quad (1.10)$$

Величина R_H^1 и $R_{МП}$ определяются по формуле

$$R_H^1 = R_{вх} = k_z + (R_{МП})_в, \quad (1.11)$$

а также по формулам (1.4) и (1.5).

Таким образом, основными характеристиками магнитострикционного материала является константа магнитострикции $\lambda_{ЭФ}$, максимальная величина магнитострикционных напряжений $(\xi_M)_{max}$ и соответствующая ей амплитуда индукции $0,5B_s$, а также величина механических потерь, которая характеризуется коэффициентом потерь ε . Указанные характеристики для разных магнитострикционных материалов приведены в таб. 1.2.

Таблица 1.2

Основные характеристики магнитострикционных материалов

Материал и его марка	Скорость звука $c * 10^{-3}, \text{м} / \text{с}$	Волновое сопротивление $\rho c * 10^{-6}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$	Эффективная константа магнитострикции $\lambda_{\text{эф}} * 10^7, \frac{\text{Па}}{\text{Тл}}$	Максимальное значение магнитострикционных напряжений $(\xi_M)_{\text{max}}, \text{МПа}$	Амплитуда индукции насыщения $B_s, \text{Тл}$	Коэффициент потерь $\epsilon * 10^3$ при относительной деформации	
						$\epsilon_m < 10^{-6}$	$\epsilon_m = 10^{-4}$
Пермендюр 50КФ	5,2	42,5	1,75	75	2,4	0,83	7
Никель НП-2	4,9	43,5	1,9	35	0,6	5,0	14,2
Альфер 8Ю	4,8	31,5	0,4	33	1,7	1,2	8,3
Феррит 21СИА	5,9	31	2,9	20	0,3	1,4	10

На рис. 1.8 показана конструкция пьезоэлектрического преобразователя [31]. Он состоит из пьезокерамических колец, закрепленных между двумя металлическими пластинами с помощью резьбового соединения. Чтобы поляризовать пьезопластины, крайние из них заземляются, а на средний электрод подается напряжение. Между средним электродом и крышками пластин помещается изоляционная втулка, обеспечивающая электрическую изоляцию от центрального металлического стержня.

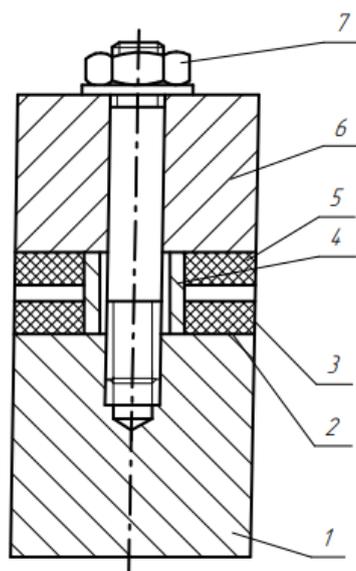


Рис. 1.8. Конструкция пьезокерамического преобразователя: 1 – нижняя накладка; 2, 5 – пьезокерамические кольца; 3 – средний электрод; 4 – изолирующая втулка; 6 – верхняя накладка; 7 – стяжная шпилька с гайкой и шайбой

Композитный пьезоэлектрический преобразователь имеет критические геометрические параметры, включающие высоту (l_1 и l_3) прокладок, толщину ($l_{пэ}$) пьезокерамических колец и площадь поперечного сечения как прокладок, так и пьезоэлементов. Для проведения точных расчетов необходимо знать волновое сопротивление и коэффициенты потерь, присущие материалам, из которых изготовлены прокладки и пьезоэлементы. Как правило, материал и площадь поперечного сечения прокладок выравниваются для обеспечения однородности. Размеры пьезокерамических элементов обычно соответствуют стандартным измерениям. Длина волны накладок определяется условиями резонанса. В асимметричном преобразователе, таком как описываемый

пьезоэлектрический преобразователь, уравнение для условий резонанса выражается следующим образом:

$$\tan(\alpha_1 + \alpha_3) \operatorname{ctg} \alpha_2 = - \left[\frac{1}{2} \left(q + \frac{1}{q} \right) - \left(q - \frac{1}{q} \right) \frac{\cos(\alpha_1 - \alpha_3)}{\cos(\alpha_1 + \alpha_3)} \right], \quad (1.12)$$

где $q = \frac{Z_2}{Z_1}$; $\alpha_{1,3} = \frac{\omega l_{1,3}}{c_1}$; $\alpha_2 = \frac{2l_2\omega}{c_2}$

Здесь $Z_2 = \rho_2 c_2 S$, $Z_1 = \rho_1 c_1 S$ – механические импедансы пьезокерамики и накладок; c_2, c_1 – скорость звука; ρ_2, ρ_1 – плотность; S_2, S_1 – площадь поперечного сечения.

Выражение F_m и $R_{МП}$ в формуле (1.2) для пьезоэлектрического преобразователя имеют вид

$$F_m = 2\omega d_{ik} \rho_2 c_2 S_2 \sin \alpha_1 U_m, \quad (1.13)$$

$$R_{МП} = (\pi - \alpha_2) Z_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 Z_2 \varepsilon_2 \left(\frac{\sin \alpha_1}{q} \right)^2. \quad (1.14)$$

В работе [65] показано, что в зависимости от величины потерь в материалах пьезокерамики и накладок и величины приведенного сопротивления нагрузки R_H^l определяется значение α_1 и амплитуда колебательных смещений на торце преобразователя.

Вводя обобщенный параметр $p = \frac{\pi}{2\alpha_2} * \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} q \left[1 + \frac{2}{\pi} * \frac{R_H^l}{Z_1 \varepsilon_1} \right]$, получим

$$\frac{\xi_m}{U_m} = \begin{cases} \frac{e}{2\sqrt{p}} & \text{при } p \leq 1 \\ \frac{e}{1+p} & \text{при } p \geq 1 \end{cases}, \quad (1.15)$$

где $e = \frac{2d_{ik}\varepsilon_2}{\alpha_2} * q^2$, здесь d_{ik} – пьезомодуль материала, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коэффициенты потерь в материалах накладок и пьезокерамики.

С величиной параметра p связана и волновая длина накладки. При $p \leq 1$ $\sin(\alpha_1)_{\text{опт}} = \sqrt{p}$, для $p \geq 1$ $(\alpha_1)_{\text{опт}} = \frac{\pi}{2}$. Волновая длина второй накладки находится из условий резонанса.

Основные характеристики пьезокерамических материалов приведены в таб. 1.3. Характеристики стали и титановых сплавов, используемых при изготовлении УЗКС, даны в таблице 1.4.

Анализ показывает, что в большинстве случаев для УЗКС параметр $p = 2..5$. При этом амплитуда колебательных смещений на выходе преобразователя определяется величинами пьезомодуля d_{33} , коэффициента потерь в пьезоматериале ε_2 и существенно зависит от величины коэффициента потерь в накладках ε_2 . Очень важным фактором выбора типа преобразователя является усталостная прочность конструкции, определяющая максимальную амплитуду колебательных смещений на выходе преобразователя. Так, например, магнитострикционные преобразователи на частоте порядка 20 кГц позволяют получить амплитуду смещений ξ_m порядком 10 мкм, амплитуда пьезоэлектрических преобразователей не превышает 3 мкм. Поэтому в большинстве высокоамплитудных колебательных систем, как правило, используют магнитострикционные преобразователи. Вместе с тем магнитострикционные преобразователи имеют недостатки, заключающиеся в сравнительно большом весе и необходимости их охлаждения в процессе работы.

УЗКС, применяемые в различных технологиях, как правило, являются многозвенными-многополуволновыми колебательными системами. Анализ акустических потерь в самом преобразователе, волноводе и инструменте с целью повышения амплитуды смещения представляет актуальную проблему для УЗКС, в особенности для пьезокерамических преобразователей.

С целью выбора типа преобразователя для обеспечения ультразвукового ППД был проведен сравнительный анализ характеристик пьезокерамического и магнитострикционного преобразователей технологического назначения, данные приведены в таблицах 1.3-1.5.

Таблица 1.3

Основные характеристики пьезокерамических материалов

Материал и его марка	Скорость звука $c * 10^{-3}, \text{ м / с}$	Волновое сопротивление $\rho c * 10^{-6}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}$	Пьезомодуль $d_{ik} * 10^{10}, \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$	Коэффициент потерь $\epsilon * 10^3$ при относительной деформации	
				$\epsilon_m < 10^{-6}$	$\epsilon_m \approx 10^{-4}$
ТБК-3	4,7	24,9	1,4	3,3	7,4
ЦТБС-3	3,4	24,8	4,0	4,0	10
ЦТС-23	3,2	24,0	2,0	5,0	13,3

Таблица 1.4

Предел выносливости и максимальная амплитуда для различных материалов

Материал	Марка	Предел выносливости $\sigma_{-1}, \text{ МПа}$	Волновое сопротивление		Максимально допустимая амплитуда $\xi_{\text{max}}, \text{ мкм}$
			$\rho * 10^{-3}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c * 10^{-3}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	
Низкоуглеродистые стали	10	120..150	7,8	5,0	12..15
	30	170..210	-	-	15..21
Среднеуглеродистая сталь	45	190..250	7,85	5,06	20..26
Технический титан	BT1-0	260	4,5	5,07	45
Легированные стали	12ХНЗА	300..400	7,85	5,04	31..41
	18ХНВ	380..440	8	5,02	39..45

	65Г 30ХГСА	450..500 400..500	7,85 -	5,08 -	46..51 41..51
Титановые сплавы	BT5-1 BT3-1	450..500 500	4,46 4,5	5,2 5,06	78..85 85

Таблица 1.5

Сравнительная характеристика ультразвуковых преобразователей технологического назначения

1.	Характеристика	Составной пьезопреобразователь	Магнитострикционный из сплавов	Магнитострикционный ферритовый
2.	Излучаемая мощность	Большая	Небольшая	Небольшая
3.	Рабочие частоты	Любые	Низкие ультразвуковые, на высоких – большие потери на токи Фуко	Любые, т.к. электрический диэлектрик
4.	Амплитуда	Высокие с трансформаторами	Высокие	Невысокие
5.	Прочность	Высокая при армировании	Высокая	Низкая
6.	Индукция насыщения	-	Большая	Малая
7.	Коррозионная стойкость	Средняя	Низкая	Высокая
8.	Кавитационная стойкость	Низкая	Средняя	Низкая

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Методика общих исследований

К объектам исследования были отнесены удлинённые цилиндрические детали, относящиеся к типу нежестких валов, например, штоки гидроцилиндров, цилиндрические направляющие, оси коромысел, оси и штанги толкателей, см. рис. 2.1.



Рис. 2.1. Цилиндрические длинномерные детали

Такие детали подвергаются высоким нагрузкам, изготавливают их, в том числе, из стали 45, шлифуют, а для повышения прочности, устойчивости к износу ее поверхность дополнительно подвергается химико-термической и термической обработке (цементация, закалка).

Замена стали специальных дорогостоящих марок на конструкционную, подвергаемую вместо шлифования ультразвуковой обработке (УЗО), и исключение ХТО (цементации и закалки) из технологического процесса изготовления нежестких валов, снизит риск возможного растрескивания рабочих поверхностей.

Для подтверждения результатов, полученных на основе теоретического анализа и при оптимизации процессов ультразвуковой поверхностной пластической деформации с использованием набора оборудования, интегрированного в стационарный металлорежущий станок, была разработана комплексная методология исследования.

Методология исследования ППД с использованием ультразвука в таких изделиях, как нежесткие валы, основывается на выборе объекта исследования, определении технологических характеристик, связанных с процессом и оценке энергетических параметров ультразвукового оборудования.

Выбор объекта исследования определился из анализа литературных данных (глава 2, раздел 2.1).

Основными технологическими факторами, определяющими эффективность процессов с использованием ультразвуковой обработки, являются:

- излучаемая акустическая мощность, $N_{уд}$;
- амплитуда колебательных смещений излучателя ξ , мкм;
- подача S (мм/об), обороты n (об/мин), частота f (кГц), сила прижима F_N (Н), скорость резанья V_R (м/мин);

К параметрам качества поверхностного слоя ППД были отнесены шероховатость Ra и Rz , длина профиля tp , твердость H (кгс/мм²), микротвердость $H\mu$ (МПа) и остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ (МПа).

Общий вид экспериментальной установки для ультразвукового упрочнения представлен на рис. 2.2, где 1 - колебательная система, закрепленная на суппорте модернизированного токарно-винторезного станка 1К625; 2 - деталь, закрепленная с одной стороны в патроне и с другой – в задней бабке станка.

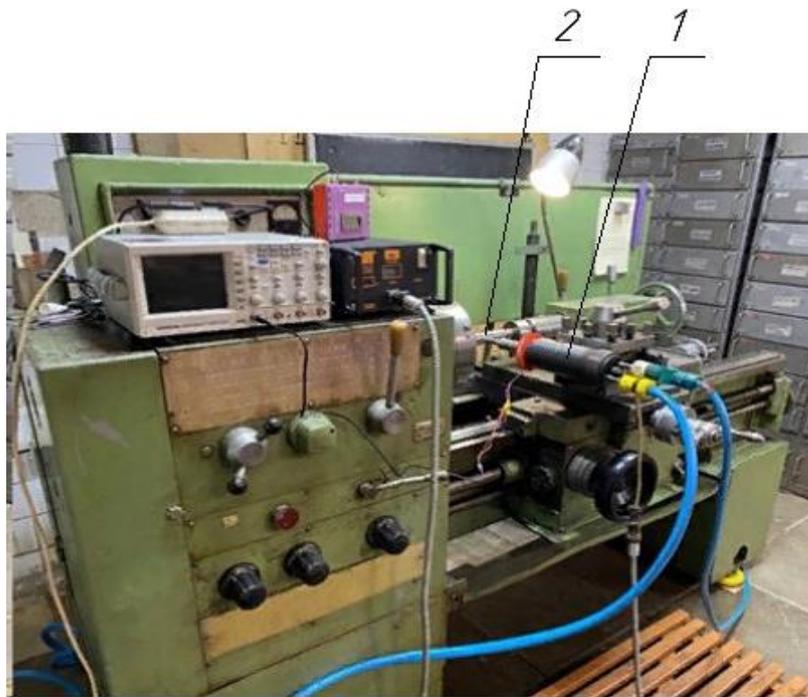


Рис. 2.2. Общий вид экспериментальной установки ультразвукового ППД

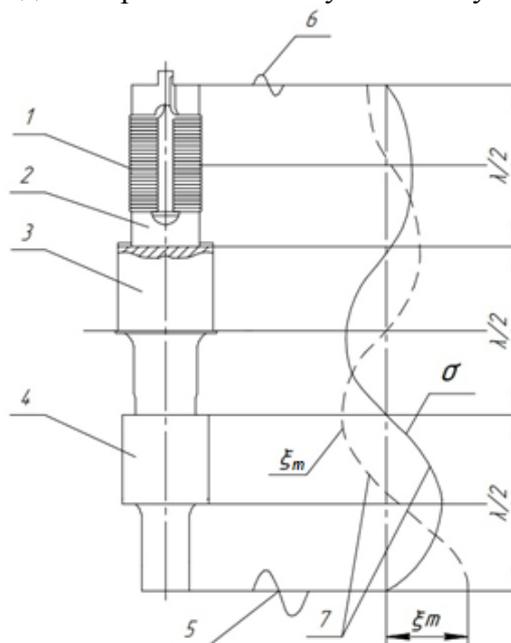


Рис. 2.3. Ультразвуковая трехполуволновая колебательная система с магнитострикционным преобразователем и характеристики смещения ξ_m и механического напряжения σ

1 – обмотка магнитострикционного преобразователя

2 – магнитострикционный преобразователь

3 – концентратор (волновод) 4 – излучатель

5,6 – изменение смещения во времени в излучателе (инструменте) и преобразователе
 7 – распределение смещения ξ_m и механического напряжения σ по длине колебательной системы

Источником ультразвуковых механических колебаний является 3х полуволновая УЗКС, рис. 2.3. Ультразвуковая колебательная система (рис. 2.4), размещается на суппорте и крепится между двух плит, соединенных специальной планкой (2). Закрепление УЗКС на суппорте станка осуществляется с помощью болтов (3). На боковых поверхностях плит крепятся ролики (4). Между роликами перемещаются направляющие (5), которые прикреплены к кожуху (6) УЗКС (7). Таким образом УЗКС с помощью этих направляющих имеет возможность перемещаться вперед и назад.

Нагружение инструмента (8) осуществляется вручную с помощью суппорта. Для этой цели между передней крышкой (9) кожуха и соединительной планкой (2) установлена предварительно тарированная пружина (10). Точность перемещения и высота головки достигается регулировкой ролика (4) посредством эксцентриков.

Набранный из пермендюртовых пластин, магнитострикционный пакет припаивается к стальному волноводу из стали 45 (11) с помощью серебряного припоя и флюса №209 на установке ТВЧ [67, 68].

Обмотка магнитострикционного пакета производится проводом БПВЛ сечением 1,5 мм². Инструмент-индентор (12) ступенчатого типа соединяется с концентратором-волноводом (11) на резьбе. Магнитострикционный пакет охлаждается проточной водой. Конструкция стержневой колебательной системы и технология ее изготовления разработаны в лаборатории кафедры Технологии конструкционных материалов МАДИ (ЛЭФМО).

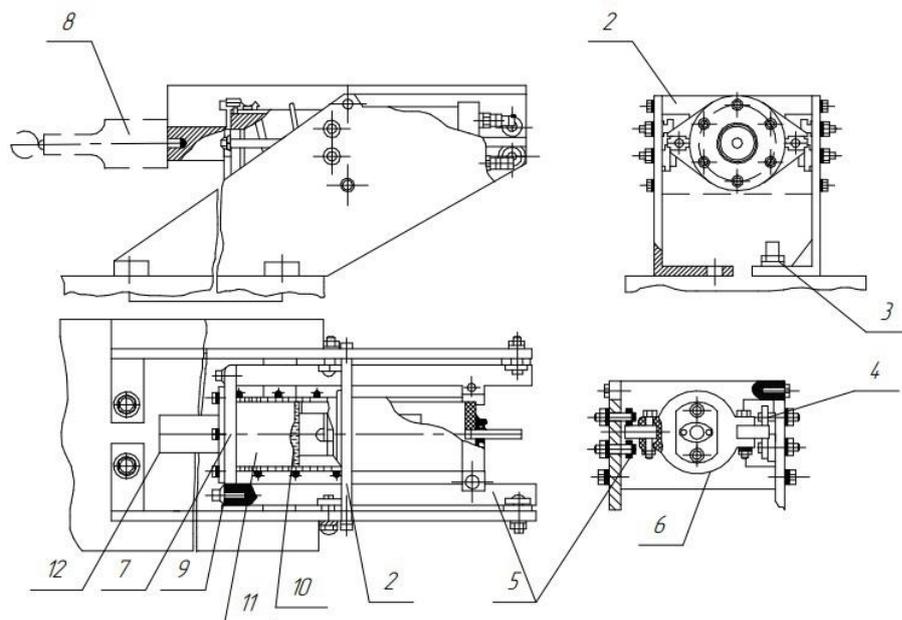


Рис. 2.4. Схема размещения на суппорте УЗКС

Для определения амплитуды смещения ультразвукового инструмент-индентора проводились измерения половины механического смещения в определенной точке его торца при помощи микроскопа. Для регистрации данных смещений использовались электродинамический датчик, микроскоп и стрелочный индикатор. Positionирование электродинамического датчика производилось на волноводе УЗКС, согласно рисунку 2.5. Сигналы от датчика в процессе работы УЗКС поступали на аналого-цифровой преобразователь платы L-750. Для калибровки шкалы спектрального анализатора проводилась тарировка на величину амплитуды смещений на рабочем конце концентратора ультразвуковой системы при помощи виброметра БВУ-3М, рис. 2.6.

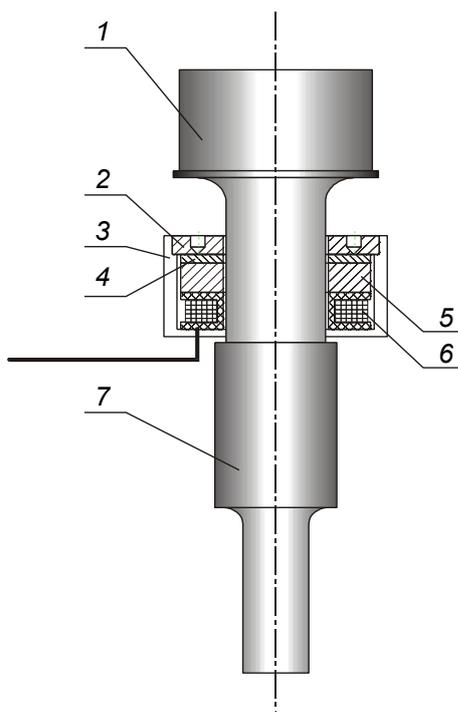


Рис. 2.5. Электродинамический датчик: 1 – волновод; 2 – крышка; 3 – корпус; 4 – центрирующее кольцо; 5 – постоянный магнит; 6 – катушка; 7 – излучатель ультразвука



Рис. 2.6. Бесконтактный виброметр БВУ-3М для измерения амплитуды колебательных смещений излучателя ультразвука

2.2. Методика исследование УЗКС

Работоспособность колебательной системы, как показывают эксперименты и производственный опыт, зависит от физико-механических свойств материалов концентратора (волновода) излучателя и рабочего инструмента. Материал, предназначенный для изготовления концентраторов и излучателей, должен обладать высокими упругими свойствами ($\sigma_{0,01} =$

880 ÷ 1150 МПа), низким декрементом затухания, высокой усталостной прочностью, хорошей обрабатываемостью различными методами.

Исследованиями установлено [30, 42], что потери акустической энергии на внутреннее трение в высокоуглеродистых и легированных сталях значительно ниже, чем в малоуглеродистых.

Для изготовления концентраторов и инструмента-индентора используются аустенитные стали, малоуглеродистые нетермообработанные стали 45, 50, 40Х, 65Г, закаленная высокоуглеродистая сталь У9 [69].

Большое значение для эффективной работы концентратора, и излучателя, инструмента-индентора, имеет его усталостная прочность. Кроме выбора более прочного материала увеличить усталостную прочность концентраторов можно обработкой методами пластического деформирования, например, обработка дробью, обкатыванием роликами, обработка ультразвуком [42].

Предел выносливости можно также увеличить химико-термической обработкой (азотированием, цементированием) и поверхностной закалкой ТВЧ (особенно в области резкого изменения площади в ступенчатых концентраторах) [70].

Крепление инструмента-индентора к волноводу осуществляется с помощью резьбового соединения, которое делается, как правило, прослабленным чтобы при заворачивании происходило плотное сочленение плоскостей волновода и излучателя и тем самым передача колебаний между ними осуществлялась без потерь.

На рисунках 2.7 и 2.8 показана блок-схема и устройство для передачи ультразвуковых колебаний, которое работает в диапазоне частот от 22 до 44 кГц. Система была разработана и произведена в МАДИ [31] и состоит из четырех основных компонентов: магнестриктора, волновода, излучателя и охлаждающего кожуха. Генератор УЗГ5-1.6 с выходной мощностью 1,6 кВт обеспечивает питание колебательной системы. Для поддержания постоянной частоты используется звуковой генератор ГЗ-33 в качестве эталонного

источника колебаний и цифровой частотомер Ф-576 для точных и стабильных измерений частоты.

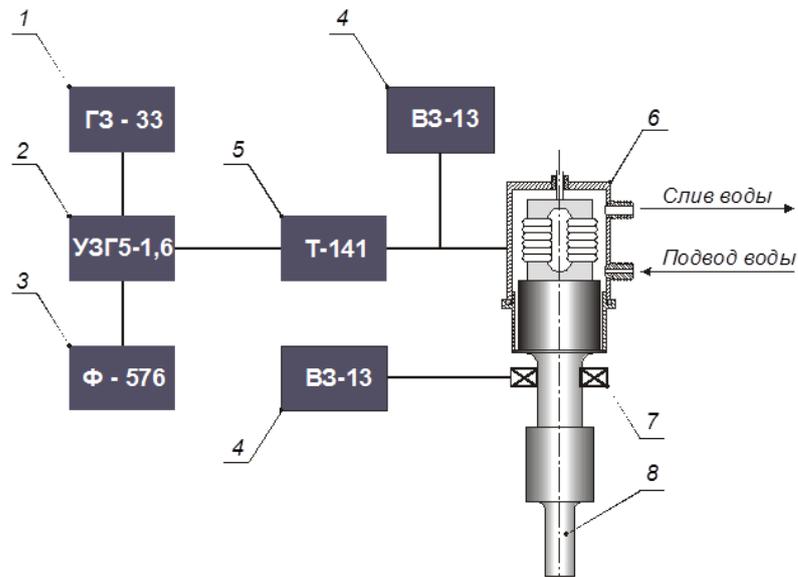


Рис. 2.7. Блок-схема измерения основных акустико-технологических параметров процессов ультразвуковой обработки:
 1 – задающий генератор; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – частотомер; 4 – милливольтметр; 5 – ваттметр; 6 – колебательная система; 7 – электродинамический датчик; 8 – излучатель;

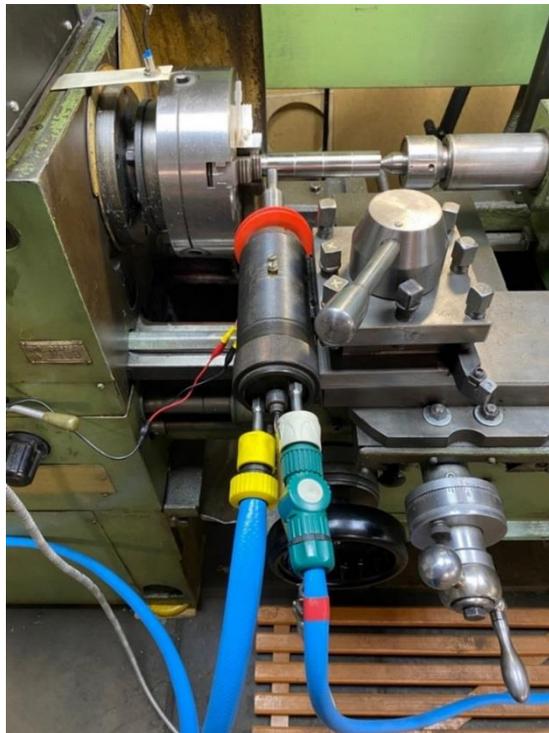


Рис. 2.8. Общий вид экспериментальной установки для импульсного ультразвукового упрочнения

2.3. Исследование износостойкости

В ходе испытаний были воспроизведены условия приближенные к эксплуатационным, которые приводят к образованию износа на поверхности из-за трения. Исследуемый образец представляет собой полую цилиндрическую деталь, изготовленную из закаленной стали 45. Образцы, нарезанные из исследуемого заготовки, были обработаны поверхностным пластическим деформированием с ультразвуком и затем подвергнуты трению и износу.

Главными задачами эксперимента были:

- получение устойчивых достоверных результатов;
- количественная оценка повышения износостойкости по сравнению с исходными образцами, изготовленными по существующей заводской технологии.

Для проведения испытания на износостойкость был подготовлен комплекс оборудования и оснастки, включающий универсальную машину трения УМТ-2168 «Унитриб» (рис. 2.9.) лабораторные электронные весы ВЛА-200г – М и оптиметр.

Машина трения УМТ-2168 «Унитриб» отличается универсальностью и бесступенчатым изменением скоростей и нагрузок в широком диапазоне значений.

Контрольные измерения величины износа проводились каждый час работы машины трения. В соответствии ГОСТ 30480-97 величина износа оценивалась по уменьшению радиального размера испытываемого образца. Уменьшение радиального размера оценивалось измерением отклонения размера изношенной поверхности от ее первоначального размера с помощью оптиметра с ценой деления 1 мкм. Измерение образца производились в одних и тех же точках.

Для получения различных конфигураций испытаний использовались специализированные приспособления, благодаря которым реализуются

различные схемы, например "вал-втулка" или "вал-штифт". Схема установки обеспечивает вращательные и колебательные движения вала во время испытаний. Редуктор привода позволяет непрерывно регулировать скорость вращения вала в диапазоне от 50 до 3000 об/мин. Нормальная нагрузка, прикладываемая к образцам, регулируется в диапазоне от 0,02 до 5 кН путем регулирования давления сжатого воздуха, подаваемого в пневматический привод.

Оптиметр был оснащен дополнительным устройством фиксации образца, обеспечивающим измерение отклонения размера изношенной поверхности образца в одних и тех же точках поверхности после каждого цикла испытания.

Для оценки влияния упрочняющей обработки проводились испытания образцов из конструкционной стали 45 на режимах, имитирующих реальные условия работы детали без использования смазочного материала.

Испытания на машине трения проводились в соответствии с ГОСТ 30480-97 с использованием конфигурации "вал-втулка" без смазывающего материала. На рисунке 2.9 показана принципиальная схема испытаний. Каждый образец подвергался нагрузке $F = 500$ Н и скорости вращения контртела $n = 150$ об/мин в течение 240 минут. В качестве материала контртела использовался чугун СЧ-18 диаметром 5 мм.

Для каждого образца проводилось четыре измерения. Испытания на износостойкость проводились на пяти образцах.

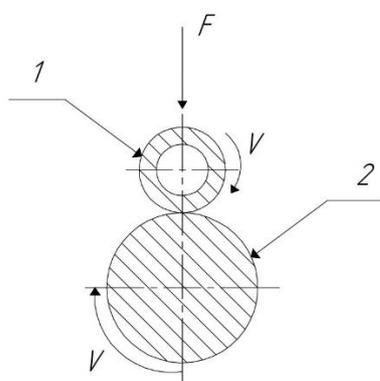


Рис. 2.9. Принципиальная схема универсальной машины трения УМТ-2168 «Унитриб»: 1 – втулка «контртело»; 2 – вал

2.4. Методика измерения шероховатости поверхности R_a , относительной опорной длины профиля t_p , твердости и микротвердости

Для оценки шероховатости поверхности R_a после различных видов ультразвукового воздействия использовался контактный высокочувствительный прибор профилограф-профилометр модели 252 завода «Калибр». При этом измерения повторялись не менее 5 раз в разных сечениях.

Другой важной геометрической характеристикой качества поверхности детали является относительная опорная длина профиля t_p . Поэтому, чтобы более правильно оценить качество различно обработанных поверхностей наряду с критериями R_z и R_a рассматривалась величина фактической площади износа на исследуемом образце, т.е. той площади, которая образуется от контртела. Величина фактической площади до некоторой степени может характеризоваться длиной опорной поверхности. На профилографе-профилометре исследовалась величина t_p в разных сечениях и строились графики опорной поверхности.

В работе также были проведены металлографические исследования влияния различных видов ультразвуковой обработки на структурные изменения. Эти исследования проводились на микроскопе Neophot-21.

Для оценки твердости HV поверхностного слоя до и после обработки производились измерения на твердомере модели ТП-2 (ГОСТ 2999-75) по шкале Виккерса.

Для проведения измерений микротвердости H_μ использовался прибор ПМТ-3 - специализированный микротвердомер, предназначенный для оценки микротвердости различных материалов, таких как металлы, абразивные материалы, керамика и минералы (см. рис. 2.10). Диапазон нагрузки был выбран для оценки от 50 до 150 г. Время пребывания под нагрузкой и время разгрузки были установлены на 10 секунд каждое. Образцы для испытаний были подготовлены в соответствии со стандартными процедурами, включающими полировку мелкозернистой алмазной пастой. Каждый образец

измерялся 10 раз с интервалом 50 мкм на глубину 2-2,5 мм. В каждой точке проводилось три измерения. Полученные результаты обрабатывались с помощью статистических методов.



Рис. 2.10. Микротвердомер ПМТ-3

2.5. Методика рентгенографического исследования параметров тонкой структуры и оценка остаточных напряжений

При холодном пластическом деформировании в материале происходят разного рода нарушения кристаллического строения, значительное увеличение плотности данных дефектов, как дислокации (или их скопление), дефекты упаковки, вакансии (или их комплексы), межузельные атомы и т.д., что приводит к возникновению остаточных напряжений. Для исследования структурных изменений и остаточных напряжений в настоящей работе использовали рентгеновский метод. Интерференционные рентгеновские линии, снятые с поверхности образцов, несут информацию о структурных и фазовых изменениях в кристаллах, остаточных напряжениях, об измельчении зерен, о дефектах упаковки и др., поэтому рентгеноструктурный анализ, наряду с измерением твердости, микротвердости и металлографией был выбран в качестве основного из методов для исследования качества поверхностного слоя после обработки ультразвуковым инструментом.

Остаточные напряжения I рода, осевые и тангенциальные определялись на рентгеновской установке ДРОН-3. Использовался распространенный метод съемки под разными углами ψ , «метод $\sin^2\psi$ ». Съемки проводились при $\sin^2\psi = 0; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$; снималась линия $\beta(211)$ α – фазы (феррита) в излучении хрома $Cr_{k\alpha}$.

Кроме того, при исследовании остаточных напряжений I рода использовали метод колец [71]. В качестве образцов применяли тонкостенные кольца, разрезанные по образующей. Для определения величины остаточных напряжений в поверхностных слоях разрезанного кольца производят их постепенное удаление электрохимическим травлением, фиксируя происходящую при этом деформацию на бумажной ленте. Электролит состоит из восьми частей (по объему): пяти частей H_3PO_4 , двух частей H_2SO_4 и одной части воды. Режим травления: плотность тока 11 а/дм^2 ; напряжение 5В. Перед опусканием в электролит внутреннюю поверхность и торцы кольца покрывали тонким слоем цапон-лака.

Определение напряжения II рода осуществлялись рентгенографическим методом на установке ДРОН - 3. Для рентгеновской съемки исследуемых образцов использовалось кобальтовое излучение ($Co_{k\alpha}$) $1/\lambda = 1,7928 \text{ \AA}^{-1}$, напряжение рентгеновской трубки $U = 28 \text{ кв.}$, анодный ток $J = 31 \text{ мА}$.

Определение микронапряжений проводилось на основании полученных рентгенограмм по уширению линии (211), определялись общая ширина линии (211) исследуемых образцов и эталонного образца, отожденного в вакууме при $T = 650^\circ\text{C}$.

2.6. Методика обработки экспериментальных данных

Результаты экспериментов, полученные при проведении исследований по влиянию режимов ультразвуковой обработки математически обрабатывались с целью выявления эффекта влияния режимов обработок на физико-механические свойства металла, а также построения математических моделей однофакторных экспериментальных зависимостей микротвердости

от глубины упрочненного поверхностного слоя и износостойкости от времени испытания образцов на машине трения УМТ-2168 «Унитриб». Результаты рентгенографических исследований по влиянию режимов обработки на величины микродеформаций, микронапряжения (напряжения II-го рода, плотность дислокаций, блочность, а также микронапряжений (напряжения I-го рода) производились по известной методике [47].

Для выявления значимости эффекта обработки использовалась методика описанная в [72]. Для решения вопроса о значимом (неслучайном) или незначимом (случайном) расхождении параметров (твердости, микротвердости, износостойкости) рассчитывалась величина

$$t_{\text{расч.}} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S \times \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2.1)$$

где $S = \sqrt{\frac{(n_1-1) \times S_1^2 + (n_2-1) \times S_2^2}{(n_1-1) + (n_2-1)}}$

\bar{X}_1 и \bar{X}_2 – усредненные значения соответствующих измеряемых величин (твердости, микротвердости и т.д.) по числу параллельных опытов n_1 и n_2 обработанной и необработанной стали в заданном режиме;

S_1^2 и S_2^2 – дисперсии воспроизводимости соответственно необработанной и обработанной стали.

Расчетное значение $t_{\text{расч.}}$ – критерии – сравнивается с табличным значением t – критерии, $t_{\text{табл}}$ при заданном значении вероятности надежности P и числа степеней свободы K равным $K = n_1 + n_2 - 2$. Если $t_{\text{расч.}} > t_{\text{табл}}$, то расхождение неслучайно, то есть в процессе ультразвуковой обработки происходит изменение исследуемых физико-механических свойств.

Если $t_{\text{расч.}} \leq t_{\text{табл}}$, то влияние обработки на величину твердости, микротвердости, износостойкости незначительное, т.е. соответствующая обработка не оказывает влияния на физико-механические свойства.

Для построения математических моделей, описывающих однофакторные зависимости микротвердости от глубины упрочненного слоя

и износостойкости от продолжительности испытаний использовался метод наименьших квадратов.

Для описания экспериментальных зависимостей, использовалась математическая модель вида:

$$Y^T = B_1 \times X^L + B_2 \times X^{L-1} + B_3 \times X^{L-2} + \dots + B_{L+1} \quad (2.2.)$$

в качестве Y^T принимается микротвердость (в МПа) или износостойкость (в мкм или г.), а за X соответственно принимается глубина упрочненного поверхностного слоя стали (отсчитывается от поверхности образца в мм) или продолжительность испытаний (в часах).

Расчет математической модели вида (2.2.) проводился на ЭВМ по программе, разработанной автором на кафедре технологии конструкционных материалов МАДИ [73].

Исходные экспериментальные данные проверялись на однородность дисперсии по критерию Кохрена, после нахождения математической модели (т.е. определения ее коэффициентов) осуществлялась проверка на адекватность экспериментальных данных по критерию Фишера.

ГЛАВА 3. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ППД С УЛЬТРАЗВУКОМ

3.1. Теоретический анализ высокоамплитудных УЗКС

Как уже отмечалось, основным фактором, определяющим эффективность ультразвукового ППД, является амплитуда смещения рабочего инструмента УЗКС. Для осуществления технологических процессов ППД и химико-термической обработки (ХТО) с ультразвуком, как правило, используются высокоамплитудные УЗКС: 2х-полуволновые или 3х-полуволновые. Проанализируем акустические потери в преобразователе, в инструменте, а также в соединительном элементе на основе теоретического рассмотрения высокоамплитудных колебательных систем. В нашем случае актуальна 2х-полуволновая УЗКС с преобразователем из пьезокерамики.

Общепринятым способом повышения амплитуд колебаний любого типа – продольных, изгибных, крутильных – является применение акустических концентраторов – стержней переменного сечения [74, 75, 76]. При уменьшении площади поперечного сечения концентратора амплитуды колебаний, колебательной скорости и механического напряжения, как правило, увеличиваются, а амплитуда колебательной силы – уменьшается. В работе использовалась другая возможность. Рассмотрим преобразователь с коэффициентом потерь порядка 0,1-0,01 и волновод-инструмент с коэффициентом потерь порядка 10^{-3} - 10^{-4} так, чтобы уровень потерь, вносимых в инструмент, был бы минимальным. Тогда потери УЗКС, приведенные к выходному торцу инструмента, должны быть минимальными, амплитуда колебаний инструмента должна повыситься. При этом необходимо иметь ввиду увеличение импеданс-чувствительности УЗКС (обратная сторона снижения уровня потерь в волноводе-инструменте) и связанные с этим трудности настройки УЗКС [77, 78].

Чтобы уменьшить интегральные потери и увеличить амплитуды колебаний на выходе ультразвукового контура, необходимо выбрать

соединительный элемент между преобразователем с высокими потерями и волноводом-инструментом с более низкими коэффициентами потерь. Цель состоит в минимизации потерь, передаваемых от преобразователя к инструменту.

Это достигается посредством связи преобразователя и волновода только по ниткам резьбы, например, шпильки или хвостовика, как показано на рисунке 3.1.

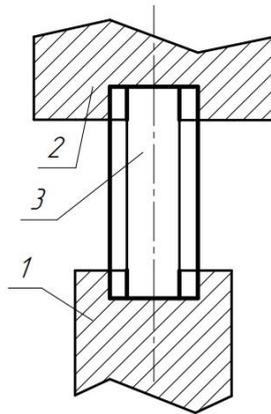


Рис. 3.1. Схема соединения волновода 1 и преобразователя 2 по ниткам резьбы шпильки (соединительного элемента) 3

Система состоит из ультразвукового преобразователя и волновода-инструмента, которые связаны элементом высокой гибкости C (см. рис. 3.2) и могут быть аппроксимированы пружиной. Преобразователь и волновод-инструмент считаются однородными стержнями. Для описания колебаний в них используем метод пренебрежения Вебстера [79].

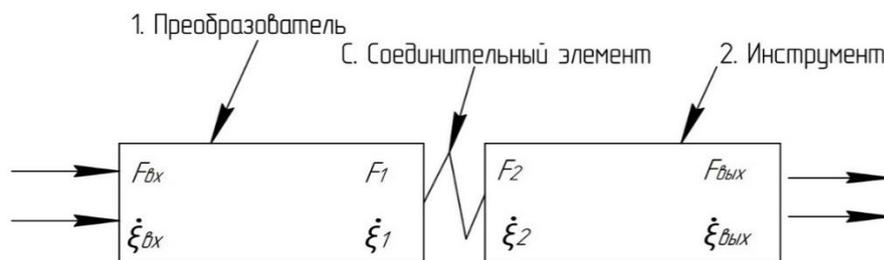


Рис. 3.2. Расчетная схема УЗКС для ППД

Выходные и входные силы и скорости для преобразователя, соединительного элемента и инструмента связаны матричными соотношениями:

$$\begin{pmatrix} F_{\text{вх}} \\ v_{\text{вх}} \end{pmatrix} = (M1) \begin{pmatrix} F_1 \\ v_1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} F_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = (Mc) \begin{pmatrix} F_2 \\ v_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} F_2 \\ v_2 \end{pmatrix} = (M2) \begin{pmatrix} F_{\text{вых}} \\ \dot{\xi}_{\text{out}} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

где $F_{\text{вх}}$ – амплитуда возбуждающей силы, приведенная к выходному сечению преобразователя, F_1 , F_2 и $F_{\text{вых}}$ – комплексная амплитуда сил на выходе преобразователя, на входе и выходе инструмента соответственно, $\dot{\xi}_{\text{вх}}$, $\dot{\xi}_1$, $\dot{\xi}_2$, $\dot{\xi}_{\text{вых}}$ – амплитуда колебательной скорости на входе и выходе преобразователя, на входе и выходе инструмента, $(M1)$, (Mc) и $(M2)$ – матрицы передачи для преобразователя, соединительного элемента и инструмента,

$$(M1,2) = \begin{pmatrix} \cos(kl)_{1,2} & -iz_{01,2} \sin(kl)_{1,2} \\ -iz_{01,2}^{-1} \sin(kl)_{1,2} & \cos(kl)_{1,2} \end{pmatrix}, \quad (Mc) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ i\omega C & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

Чтобы получить соотношения между входными и выходными параметрами колебаний УЗКС, выполним перемножение матриц в (3.1), пренебрегая потерями, при временном факторе $\exp(i\omega t)$, где ω – циклическая частота, t – время, $i = \sqrt{-1}$. Матрица передачи системы, связывающая амплитуду входных $F_{\text{вх}}$ и $\dot{\xi}_{\text{вх}}$ и выходных $F_{\text{вых}}$ и $\dot{\xi}_{\text{вых}}$ сил и скоростей системы, имеет вид:

$$(M) = (M1)(Mc)(M2) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (3.3)$$

где

$$m_{11} = \cos(kl)_1 \cos(kl)_2 - \frac{z_{01}}{z_{02}} \sin(kl)_1 \sin(kl)_2 - \omega C z_{01} \sin(kl)_1 \cos(kl)_1; \quad (3.4)$$

$$m_{12} = i(z_{01} \sin(kl)_1 \cos(kl)_2 + z_{02} \sin(kl)_2 \cos(kl)_1 - \omega C z_{01} z_{02} \sin(kl)_1 \sin(kl)_2) \quad (3.5)$$

$$m_{21} = i(z_{01}^{-1} \sin(kl)_1 \cos(kl)_2 + z_{02}^{-1} \sin(kl)_2 \cos(kl)_1 + \omega C \cos(kl)_1 \cos(kl)_2) \quad (3.6)$$

$$m_{22} = \cos(kl)_1 \cos(kl)_2 - \frac{z_{02}}{z_{01}} \sin(kl)_1 \sin(kl)_2 - \omega C z_{02} \sin(kl)_2 \sin(kl)_1 \quad (3.7)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число, c – скорость звука в стержне, l – длина, $Z_0 = \rho c S$ – характеристическое сопротивление, ρ и S – плотность и поперечное сечение стержней – преобразователя и инструмента, индекс 1 относится к преобразователю, индекс 2 – к волноводу-инструменту, C – гибкость соединительного элемента.

Переходное сопротивление УЗКС в приближении пренебрежимо малой нагрузки равно компоненте m_{12} .

Потери в элементах системы можно учесть в линейном приближении заменой

$$k_j \rightarrow k_j \left(1 - \frac{i}{2} \varepsilon_j\right); w_j \rightarrow w_j \left(1 - \frac{i}{2} \varepsilon_j\right); C_j \rightarrow C_j (1 + i \varepsilon_j); j = 1; 2, \quad (3.8)$$

где ε_j – коэффициент потерь j -го элемента.

Переходное сопротивление системы \dot{Z} равно

$$\Psi = P + i\chi; \Psi = \Psi \exp(i\theta); Z = \sqrt{P^2 + \chi^2}; \theta = \arctg \frac{\chi}{P}; \quad (3.9)$$

где

$$\chi = z_{01} \sin(kl)_1 \cos(kl)_2 + z_{02} \sin(kl)_2 \cos(kl)_1 - \omega C z_{01} z_{02} \sin(kl)_1 \sin(kl)_2; \quad (3.10)$$

$$P = \frac{1}{2} z_{01} \varepsilon_1 (\cos(kl)_2 - \omega C z_{02} \sin(kl)_2) ((kl)_1 \cos(kl)_1 - \sin(kl)_1) + \\ \frac{1}{2} z_{02} \varepsilon_2 (\cos(kl)_1 - \omega C z_{01} \sin(kl)_1) ((kl)_2 \cos(kl)_2 - \sin(kl)_2) + \\ \left(\frac{1}{2} (kl)_1 z_{02} \varepsilon_2 + \frac{1}{2} (kl)_2 z_{01} \varepsilon_1 + \omega C z_{01} z_{02} \varepsilon_c\right) \sin(kl)_1 \sin(kl)_2, \quad (3.11)$$

где Ψ и θ – модуль и фаза переходного сопротивления, P и χ – его действительная и мнимая части соответственно.

Чтобы получить условие собственных частот ненагруженной УЗКС, достаточно приравнять (3.10) нулю. Оно может быть записано в виде:

$$\cos(kl)_2 - \alpha^{-1} \frac{\omega_2}{\omega} \sin(kl)_2 = -\frac{z_{02}}{z_{01}} \operatorname{ctg}(kl)_2 \sin(kl)_2, \quad (3.12)$$

где $\alpha = (\omega_2 C z_{02})^{-1}$.

При выполнении (3.12) переходное сопротивление УЗКС действительно (см. (3.10)). Общеизвестно, что потери в активных элементах УЗКС (преобразователях) существенно превосходят потери в пассивных элементах (волноводах-инструментах и элементах связи), т.е.

$$\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2; \varepsilon_1 \gg \varepsilon_c \quad (3.13)$$

Поэтому переходное сопротивление УЗКС и амплитуда колебательной скорости на выходе при возбуждении на собственной частоте УЗКС определяет первое слагаемое (3.11), т.е. большие потери в преобразователе.

Примем в дальнейшем для определенности, что частота возбуждения нашей УЗКС близка к ее собственной частоте. Тогда можно считать, что

$$\alpha^{-1} \gg 1; \alpha^{-1} \frac{z_{01}}{z_{02}} \gg 1; |\sin(kl)_2| \ll 1. \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{Z}{z_{02}} = \frac{R}{z_{02}} = & -\frac{1}{2} \varepsilon_1 ctg(kl)_1 \sin(kl)_2 ((kl)_1 \cos(kl)_1 - \sin(kl)_1) + \frac{1}{2} \varepsilon_2 \left(\cos(kl)_1 - \right. \\ & \left. \alpha^{-1} \frac{\omega_2}{\omega} \times \frac{z_{01}}{z_{02}} \sin(kl)_1 \right) ((kl)_2 \cos(kl)_2 - \sin(kl)_2) + \frac{1}{2} \left((kl)_1 \varepsilon_2 + (kl)_2 \varepsilon_1 + \right. \\ & \left. 2 \frac{z_{01}}{z_{02}} \alpha^{-1} \frac{\omega_2}{\omega} \varepsilon_c \right) \sin(kl)_1 \sin(kl)_2. \end{aligned} \quad (3.15)$$

В силу (3.14), согласно (3.10) и (3.11), получим при $(kl)_2 \approx \pi$, $\sin \varepsilon_1 \approx -\alpha$, $\cos(kl)_2 \approx -1$ и, приняв во внимание (3.13), получаем

$$\begin{aligned} \frac{Z}{z_{02}} \approx & -\frac{1}{2} \alpha \varepsilon_1 ctg(kl)_1 ((kl)_1 \cos(kl)_1 - \sin(kl)_1) - \frac{\pi}{2} \varepsilon_2 \left(\cos(kl)_1 - \right. \\ & \left. \alpha \frac{z_{01}}{z_{02}} \sin(kl)_1 \right) - \frac{z_{01}}{z_{02}} \left(\frac{1}{2} \alpha (kl)_2 \varepsilon_1 + \varepsilon_c \right). \end{aligned} \quad (3.16)$$

Переходное сопротивление на собственной частоте определяется первым слагаемым (3.11) и потому достаточно велико, т.к. велик коэффициент потерь преобразователя ε_1 , по этой причине и амплитуда колебательной скорости будет небольшой.

Сведем первое слагаемое (3.11) к нулю. Это осуществимо при условии $\cos(kl)_2 - \alpha^{-1} \frac{\omega_2}{\omega} \sin(kl)_2 = 0$ или $-\sin(kl)_2 \approx tg(kl)_2 = \omega_2 CZ_{02} \ll 1$.

$$(3.17)$$

Тогда действительная часть переходного сопротивления теперь равна с учетом (3.11) и (3.17)

$$\frac{P}{z_{02}} = \frac{1}{2} \varepsilon_2 \left(\cos(kl)_1 - \beta^{-1} \frac{z_{01}}{z_{02}} \sin(kl)_1 \right) \left((kl)_1 \cos(kl)_2 - \sin(kl)_2 \right) + \frac{1}{2} \left((kl)_1 \varepsilon_2 + (kl)_2 \varepsilon_1 + 2 \frac{z_{01}}{z_{02}} \alpha^{-1} \varepsilon_c \right) \sin(kl)_1 \sin(kl)_2. \quad (3.18)$$

Частоту, на которой возбуждается наша УЗКС при условии (3.16), нельзя считать собственной частотой системы. Действительно, мнимая часть переходного сопротивления колебательной системы на этой частоте не равна нулю.

$$\frac{X}{z_{02}} = \sin(kl)_2 \cos(kl)_1 \approx -\alpha \frac{\omega_2}{\omega} \cos(kl)_1. \quad (3.19)$$

Таким образом, действительная часть переходного сопротивления УЗКС у нас существенно уменьшается по сравнению со случаем возбуждения УЗКС на собственной частоте, но при этом в нем (переходном сопротивлении) появляется мнимая часть. Поэтому необходимо определить условия, при которых модуль переходного сопротивления уменьшится в сравнении со случаем возбуждения УЗКС на собственной частоте.

Если волновая длина инструмента близка к π , то, с учетом (3.17),

$$0 < |(kl)_2 - \pi| \ll 1; \sin(kl)_2 \approx -\alpha; \cos(kl)_2 \approx -1. \quad (3.20)$$

Действительную часть переходного сопротивления получим подстановкой (3.20) в (3.18):

$$\frac{P}{z_{02}} \approx -\frac{\pi}{2} \varepsilon_2 \left(\cos(kl)_1 - \alpha^{-1} \frac{z_{01}}{z_{02}} \sin(kl)_1 \right) - \frac{\alpha}{2} \left((kl)_1 \varepsilon_2 + \frac{\pi z_{01}}{z_{02}} \varepsilon_1 + 2 \frac{z_{01}}{z_{02}} \alpha^{-1} \varepsilon_c \right) \sin(kl)_1. \quad (3.21)$$

Это выражение можно представить в виде:

$$\frac{P}{z_{02}} \approx -\frac{\pi}{2} \varepsilon_2 \left(\cos(kl)_1 + \frac{z_{01}}{z_{02}} \left(\alpha \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + \frac{2\varepsilon_2}{\pi \varepsilon_c} - \alpha^{-1} \right) \sin(kl)_1 \right). \quad (3.22)$$

Квадрат модуля переходного сопротивления согласно (3.11), (3.18) и (3.22) равен

$$\left(\frac{Z}{z_{02}}\right)^2 \approx (\alpha \cos(kl)_1)^2 + \left(\frac{\pi\varepsilon}{2}\right)^2 \left(\cos(kl)_1 + \frac{z_{01}}{z_{02}} \left(\alpha \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + \frac{2\varepsilon_2}{\pi\varepsilon_2} - \alpha^{-1}\right) \sin(kl)_1\right)^2. \quad (3.23)$$

Разность фаз между входной силой и выходной скоростью при этом не будет равна $\frac{\pi}{2}$, как при возбуждении УЗКС на собственной частоте, а из условий (3.9):

$$\theta = \arctg \frac{\chi}{P} \approx \arctg \frac{2\varepsilon_2 \alpha}{\pi \left(1 + \frac{z_{01}}{z_{02}} \operatorname{tg}(kl)_1 \left(\alpha \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + \frac{2\varepsilon_2}{\pi\varepsilon_1 - \alpha^{-1}}\right)\right)}. \quad (3.24)$$

В этом случае УЗКС работает на собственной частоте подсистемы с малыми потерями, состоящими из контактной гибкости преобразователя и волновода-инструмента. Преобразователь как бы «подталкивает» эту подсистему в нужные моменты, почти не внося в нее свои потери. Очевидно, что такое «подталкивание» будет наиболее эффективным на собственной частоте преобразователя, т.е. при $\sin(kl)_1 = 0$. Тогда нормированное переходное сопротивление (3.23) будет равно

$$\left(\frac{z_{H1}}{z_{02}}\right)^2 \approx \alpha^2 + \left(\frac{\pi\varepsilon}{2}\right)^2, \quad (3.25)$$

Следует отметить, что разность фаз между входной силой и выходной скоростью при этом не будет равна $\frac{\pi}{2}$. Таким образом, УЗКС возбуждается не на собственной частоте.

Нормированное переходное сопротивление одиночного волновода – инструмента при резонансе равно

$$\frac{Z_H}{z_{02}} = \frac{\pi\varepsilon}{2}, \quad (3.26)$$

а величина

$$\frac{z_{H1}}{z_{H2}} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{2\varepsilon_2 \alpha}{\pi\varepsilon_2}\right)^2}, \quad (3.27)$$

Когда произведение $\varepsilon_2^{-1}\alpha$ приближается к нулю, переходное сопротивление внутри ультразвукового контура становится аналогичным сопротивлению однородного волновода-инструмента. Следовательно, в сценариях, где $\varepsilon_2^{-1}\alpha$ остается небольшим, потери в ультразвуковом контуре, в основном, совпадают с потерями, понесенными исключительно волноводом-инструментом, при минимальном влиянии потерь на волноводе-преобразователе и других его параметров (собственной частоты, характеристического сопротивления и т.д.). Чтобы увеличить амплитуду колебательной скорости на выходе системы, должны быть выполнены следующие условия:

1. Отношение $\frac{\alpha}{\varepsilon_2}$ должно быть небольшим;
2. Коэффициент потерь элемента ε_2 , должен быть значительно выше, чем ε_1 ;
3. На выходном конце колебательной системы должна быть приложена небольшая нагрузка.

Для одновременного выполнения условий 1) и 2) необходимо, чтобы выполнялись неравенства

$$\alpha \ll \varepsilon_2 \ll \varepsilon_1 \ll 1 \quad (3.28)$$

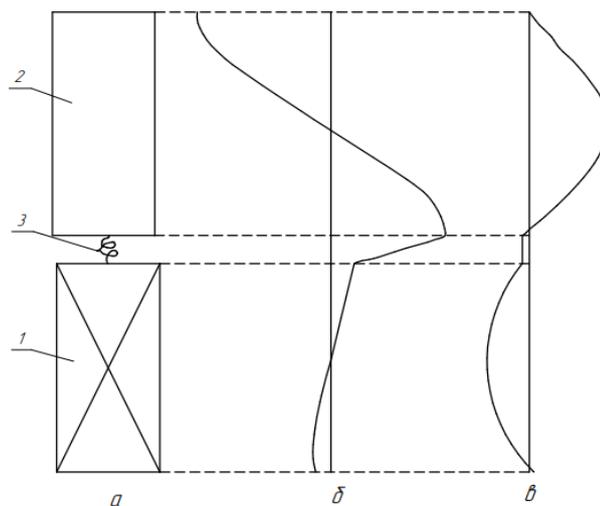


Рис. 3.3. Распределение амплитуд смещения (б) и колебательной силы (в) вдоль оси колебательной системы (а).

1-преобразователь; 2-инструмент; 3-соединительный элемент

На рисунке 3.3 приведены распределения амплитуд колебательной скорости и силы вдоль оси колебательной системы. Основным усиливающим элементом является, как видно из рисунка 3.3, соединительный элемент благодаря его высокой гибкости.

3.2. Практическая реализация высокоамплитудных колебательных систем

Конструкции высокоамплитудных колебательных систем, использующие приведенный принцип, весьма разнообразны. Однако в них всегда можно увидеть элементы описанные в предыдущем разделе. Усиление амплитуды происходит в соединительном элементе. Анализ таких конструкций довольно затруднителен, так как авторы не дают конкретных величин, а только полученный технологический эффект. Так L. Balamuth [80] предложил трехполуволновую колебательную систему, которая состоит из преобразователя и тяжелого прибора, соединенного тонким стержнем. После анализа времени нарастания амплитуд колебаний установлено, что эффективный коэффициент потерь был очень мал, а полученные величины амплитуд были довольно велики. Исходя из этого, гибкость соединительного стержня при резонансе велика из-за его малой площади поперечного сечения.

В другом исследовании автора [81] была предложена узкая схема для ППД. Преобразователь и инструмент были соединены коротким тонким стержнем. Ожидалось, что соединительный элемент будет обладать высокой эквивалентной гибкостью, выраженной как $\frac{l_c}{E_c A_c}$ при сохранении минимальной массы. Однако выполнение указанных условий представлялось сложной задачей, исходя из предоставленного описания. Гибкость соединительного элемента не была существенной.

Соединительный элемент, предложенный в [82], представляет собой цилиндрическую поверхность, ось которой перпендикулярна оси волновода-преобразователя и волновода-инструмента. Возбуждается этот элемент на собственной частоте радиально-изгибных колебаний, совпадающей с

собственными частотами других элементов УЗКС. Возможно, в этой конструкции выполняются условия, полученные в предыдущем разделе, однако, авторы [82] полученных данных по амплитудам колебаний и эквивалентным коэффициентам потерь в своей работе не привели.

Рассмотрим теперь УЗКС, в которой преобразователь с большими потерями и инструмент с низкими потерями соединены шпилькой (рис. 3.1).

Для простоты считаем гибкости резьбовых соединений одинаковыми и равными C_p . Матрицу передачи соединения получим, перемножив матрицы передачи его элементов:

$$[M_c] = [M_p] \times [M_h] \times [M_p], \quad (3.29)$$

где M_p – матрица передачи соединений, A_h – матрица передачи участка передачи шпильки между резьбовыми соединениями,

$$[M_p] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ i\omega C_p & 1 \end{bmatrix}; [M_h] = \begin{bmatrix} \cos(kl)_h & iz_{0h} \sin(kl)_h \\ iz_{0h}^{-1} \sin(kl)_h & \cos(kl)_h \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

где z_{0h} и l_h – волновое сопротивление и длина участка шпильки между резьбовыми соединениями, k_h – волновое число колебаний на этом участке.

Перемножив матрицы в (3.29), получаем матрицу передачи соединения:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{h11} & m_{h12} \\ m_{h21} & m_{h22} \end{bmatrix};$$

$$m_{h11} = m_{h22} = \cos(kl)_h - \omega C_p z_{0h} \sin(kl)_h;$$

$$m_{h12} = iz_{0h} \sin(kl)_h;$$

$$m_{h21} = iz_{0h}^{-1} \left(\sin(kl)_h + 2\omega C_p z_{0h} \cos(kl)_h + (\omega C_p z_{0h})^2 \sin(kl)_h \right). \quad (3.31)$$

Для пренебрежимо малой длины шпильки (3.31) принимает вид:

$$[M_p] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2i\omega C_p & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.32)$$

Матрица передачи сосредоточенной гибкости представляет собой вид (3.32), которую следует положить равной $2C_p$. Тогда $\alpha = 2\omega C_p z_{02}$. Формулы (3.23) – (3.27) справедливы при

$$\sin(kl)_h \ll 1 \ll \alpha^{-1}. \quad (3.33)$$

Оценим величину C_p .

$$C_p \sim \frac{R \max}{EA_\phi} = \frac{R \max}{EA_k} \times \frac{A_k}{A_{\text{НОМ}}} \times \frac{A_{\text{НОМ}}}{A_\phi}, \quad (3.34)$$

где A_ϕ – фактическая площадь акустического контакта шпильки с преобразователем и инструментом, $A_{\text{НОМ}}$ – номинальная площадь акустического контакта, осуществляемого только по ниткам резьбы, A_k – номинальная площадь акустического контакта при стыковом соединении преобразователя и инструмента.

При обычном контакте «в стык» $\alpha \sim 0,1 \div 1$. Контакт по ниткам резьбы можно при этом не учитывать. Площадь контакта уменьшается в $\frac{A_k}{A_{\text{НОМ}}}$ раз, а α во столько же раз увеличивается. Отсюда, неравенство (3.33) может быть удовлетворено при $\frac{A_k}{A_{\text{НОМ}}}$ порядка $100 \div 1000$. Это условие легко выполняется на практике, если используемый инструмент не будет слишком мал по сравнению с преобразователем.

Проведенные числовые оценки показывают, что на частотах, близких к 20 кГц, матрица передачи соединительного элемента имеет вид:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{h11} & m_{h12} \\ m_{h21} & m_{22} \end{bmatrix};$$

$$m_{h11} = a_{h22} \approx 1 - \omega C_p z_{0h} (kl)_h \approx 1;$$

$$m_{h12} \approx iz_{0h} (kl)_h \rightarrow 0;$$

$$m_{h21} \approx iz_{0h}^{-1} (\omega C_p z_{0h})^2 (kl)_h \approx i\omega C_p (i\omega C_p z_{0h}) (kl)_h. \quad (3.35)$$

Отсюда видно, что эффективная гибкость соединения в (3.35) равна $i\omega C_p (i\omega C_p z_{0h}) (kl)_h$, она высока из-за большой гибкости C_p .

Аналогичные соотношения легко получить и для других соединений, например, для упомянутых выше или при помощи хвостовика с резьбой.

3.3. Исследование высокоамплитудных УЗКС

Блок-схема установки, при помощи которой проводилась экспериментальная проверка полученных выше соотношений, приведена на рисунке 3.4.

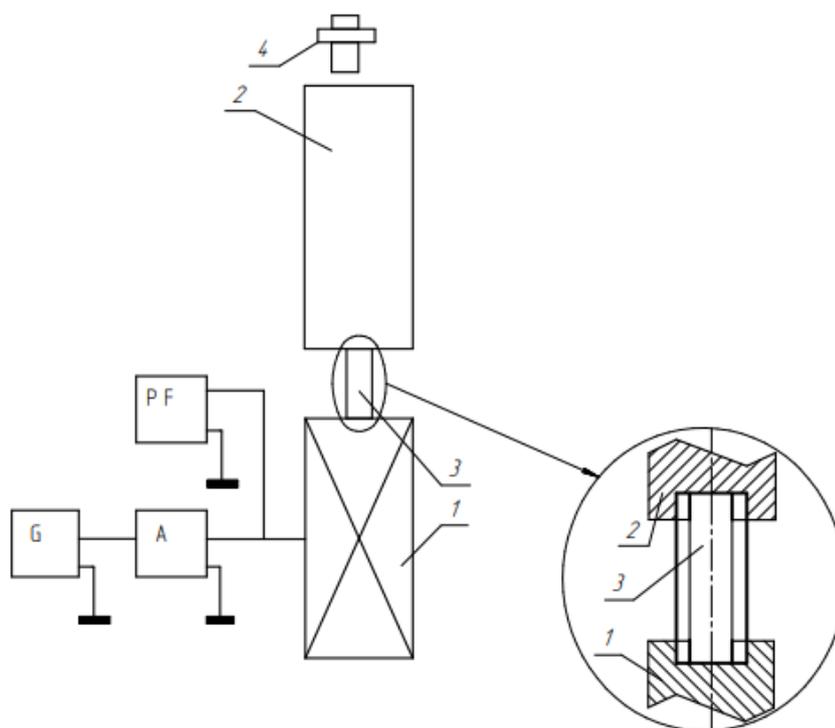


Рис. 3.4. Блок – схема экспериментальной установки. 1. Преобразователь; 2. Инструмент; 3. Соединительный элемент (шпилька); 4. Бесконтактный виброметр; G - генератор; А- усилитель; PF - частотомер.

Колебательная система состояла из составного пьезопреобразователя и волновода – цилиндра из стали 45. Стержни соединялись при помощи шпилек также из стали 45 с резьбой М8×1-6Н/6g. Допуск соосности и параллельности преобразователя, волновода и шпильки не превышал 0,1 мм. Конструкция пьезопреобразователя была подобрана так, чтобы его с максимальной степенью точности можно было аппроксимировать однородным стержнем. Было установлено, что резонансная частота и коэффициент потерь преобразователя, определенные по его амплитудно-частотной характеристике, составляют 25,3 кГц и 0,01 соответственно. Согласно табличным данным [76, 83, 84], предполагаемый коэффициент потерь для волновода составлял 0,0005. Соединение между преобразователем и волноводом было спроектировано таким образом, чтобы обеспечить акустический контакт только вдоль резьбы болта, используемого в качестве соединительного элемента. Длина волновода постепенно уменьшалась со 111 до 43 мм с последующим снижением его собственной частоты. Используемые шпильки были длиной 25 и 63 мм

соответственно. Таким образом, мы получили для исследования ряд УЗКС, которые различались только способом акустического контакта.

Параметры исследуемых УЗКС определялись по их амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ).

На рисунке 3.5 показаны две полученные в эксперименте амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), где у одной собственная частота волновода составляла приблизительно 23,9 кГц, а длина шпильки – 25 мм. АЧХ под номером 1 соответствует соединению элементов УЗКС «встык».

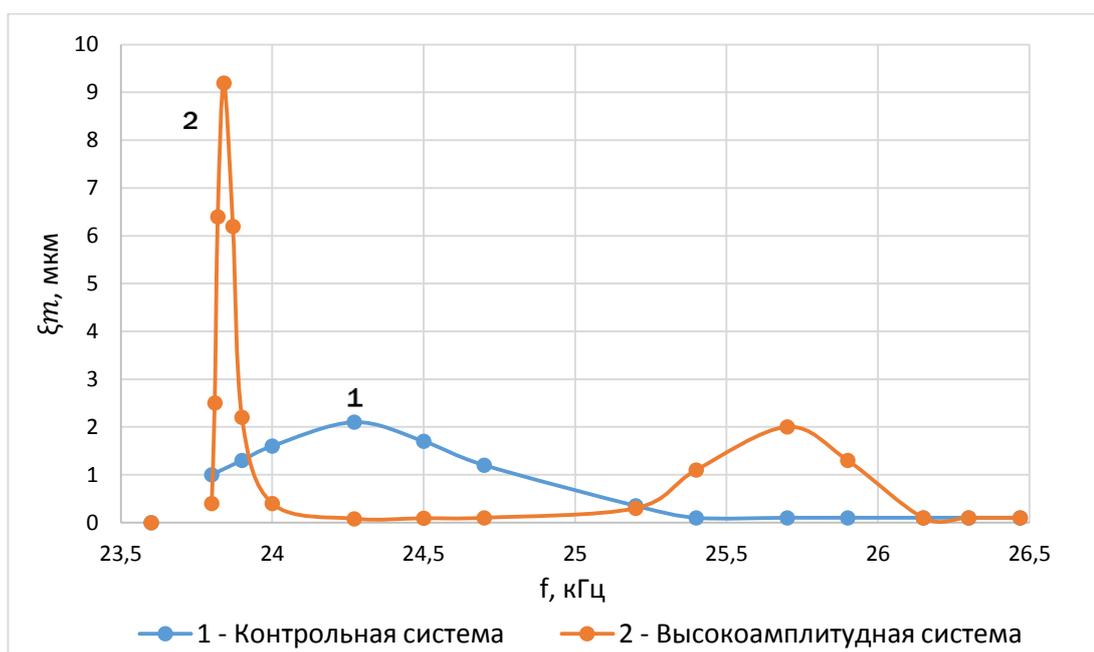


Рис. 3.5. Амплитудно-частотные характеристики высокоамплитудной и контрольной систем

Рассмотрим подробнее амплитудно-частотные характеристики исследуемой и контрольной УЗКС при данном соотношении параметров преобразователя и волновода.

Как видно из представленного графика, контрольная система (где преобразователь и волновод соединены «встык») возбуждается на единственной резонансной частоте 24,7 кГц. Эта частота представляет собой собственную частоту УЗКС, удовлетворяющую уравнению собственных частот:

$$z_{01} \sin(kl)_1 \cos(kl)_2 + z_{02} \sin(kl)_2 \cos(kl)_1 = 0, \quad (3.36)$$

УЗКС имела две рабочие частоты приблизительно 23,9 и 25,7 кГц

Исходной частотой волноводного прибора является его собственная частота, которая имеет низкий коэффициент потерь в ультразвуковом контуре (менее 0,001) из-за минимальных потерь в волноводе. Это приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний по сравнению с предыдущим случаем. Последующая резонансная частота 25,7 кГц близко совпадает с собственной частотой преобразователя. Коэффициент потерь УЗКС на этой частоте определяется увеличенными потерями внутри преобразователя.

Во всех изученных примерах УЗКС наблюдались следующие схожие закономерности: резонансная частота управляющего ультразвука была расположена между резонансными частотами предлагаемой системы, а частоты возбуждения, близкие к собственной частоте преобразователя, показали добротность и амплитуды колебаний, аналогичные таковым в контрольной системе.

Добротность и амплитуды колебаний на частотах, близких к собственной частоте инструмента, в основном, определялись низкими потерями инструмента, которые значительно превосходили соответствующие показатели системы управления.

Рисунок 3.6 иллюстрирует экспериментальные данные, детализирующие резонансные частоты предлагаемой ультразвуковой колебательной системы f_p относительно отношения собственной частоты прибора f_u и частоты преобразователя f_p .

Резонансная частота системы (частота, на которой амплитуда колебаний максимальна) очень близка к собственной частоте волновода-инструмента, что соответствует значению $f_p/f_0=1$.

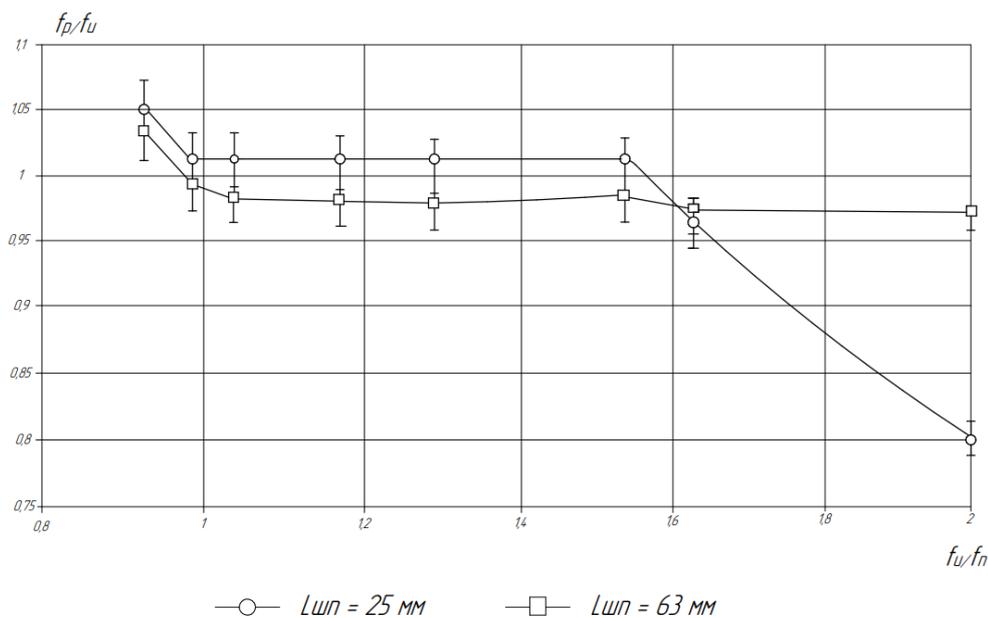


Рис. 3.6. Зависимости нормированной резонансной частоты высокоамплитудной системы f_p от отношения собственных частот инструмента f_u и преобразователя f_n при различной длине шпильки $L_{шт}$

Это справедливо даже при больших значениях f_u/f_n . Лишь при значительной разнице собственных частот инструмента f_u и преобразователя f_p ($f_u/f_n > 1,6$) и при большой длине шпильки эта частота смещается в сторону собственной частоты преобразователя f_n .

Экспериментальные зависимости амплитуд колебаний предлагаемой УЗКС ξ_m от соотношения собственных частот инструмента f_u и преобразователя f_n приведены на рис. 3.7 (ξ_m – амплитуда колебаний контрольной УЗКС).

Наибольшее значение амплитуды колебаний получается тогда, когда собственная частота волновода-инструмента f_u была чуть больше собственной частоты преобразователя f_n . Отметим, что увеличение по амплитуде колебаний наблюдался вплоть до значений $\frac{f_u}{f_n} \approx 1,5$, когда длина шпильки была 63 мм, и до значений $\frac{f_u}{f_n} \approx 1,8$ для короткой шпильки 25мм.

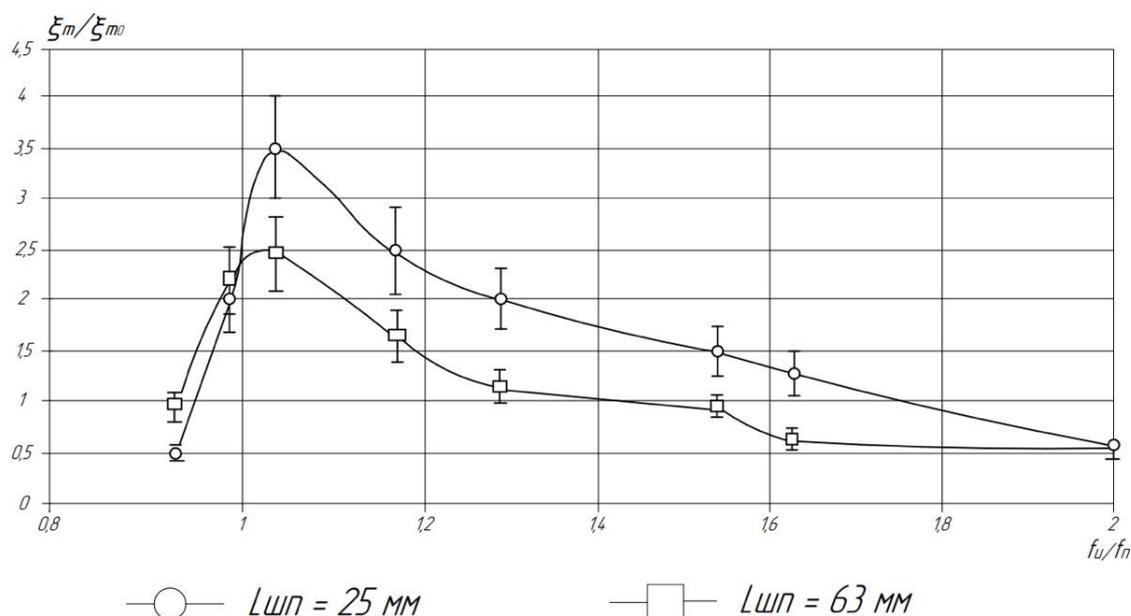


Рис. 3.7. Зависимость нормированных амплитуд колебаний инструмента от отношения собственных частот инструмента f_u и преобразователя f_p при различной длине шпильки $L_{шт}$

Из рисунка 3.7 видно, что амплитуда колебаний УЗКС существенно превышает амплитуду контрольной системы. Отметим, что в наших исследованиях отсутствовала автоподстройка частоты из-за узости полосы ее пропускания, вследствие чего настройка УЗКС была проблематичной. Не все УЗКС имеют систему автоподстройки частоты, так как они могут работать не в резонансе.

3.4. УЗКС для ультразвукового поверхностного пластического деформирования

На рисунке 3.8 (а) показана известная схема УЗКС для ППД [85, 86]. Предлагаемая схема конструкции на рис 3.8 (б), позволит уменьшить гибкость контакта между преобразователем с высокими потерями и волноводом-инструментом с низкими потерями. В этом случае пригодны соотношения приведенные выше (см. раздел 3.1-3.2).

Характерным отличием данной схемы является отсутствие непосредственного акустического контакта и обеспечение его только по ниткам резьбы шпильки.

Основные характеристики этих колебательных систем были определены с использованием установки аналогичной структурной схеме, показанной на рисунке 3.8. Устройство, использованное в исследовании, состояло из ультразвукового генератора, усилителя, частотомера, осциллографа и бесконтактного виброметра.

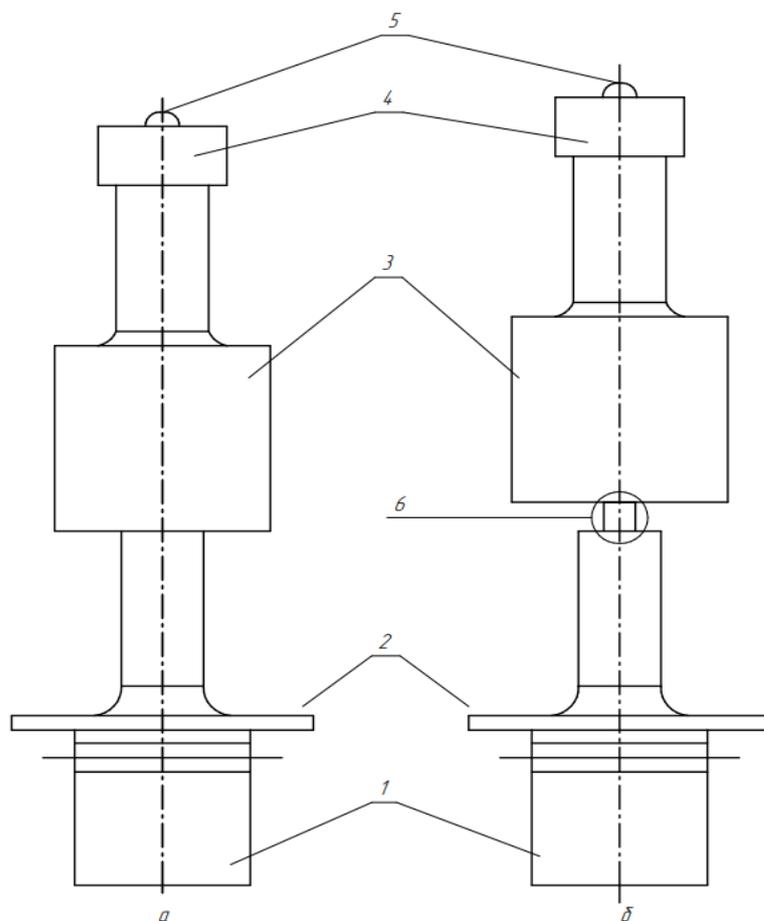


Рис. 3.8. Схемы построения колебательных систем для ультразвукового поверхностного пластического деформирования. А-классическая, Б-предлагаемая. 1. Преобразователь. 2. Устройство крепления и прижима УЗКС к упрочняемой поверхности. 3. Инструмент. 4. Устройство крепления деформирующего элемента. 5. Деформирующий элемент. 6. Элемент связи (шпильки).

Амплитудно-частотные характеристики каждой системы регистрировались при постоянном электрическом напряжении. В экспериментах определились резонансные частоты, акустические потери и амплитуды колебаний.

Собственная частота преобразователя составляла 22,4 кГц, а максимальная амплитуда колебаний достигала 5,2 мкм. Коэффициент потерь

составлял приблизительно 0,13. Ступенчатый прибор имеет собственную частоту 22,3 кГц и значительно меньший коэффициент потерь - 0,0005.

При подключении к обычной ультразвуковой системе с указанными элементами резонансная частота составляла около 22,3 кГц. При резонансе амплитуда составляла 12,3 мкм, а коэффициент потерь почти 0,1.

Предлагаемая УЗКС, в которой используются те же компоненты преобразователя и волновода-инструмента, продемонстрировала высокие показатели, которые достигли максимальной амплитуды в 22 мкм при частоте 23,5 кГц со значительно сниженным коэффициентом потерь 0,0007.

3.5. Обсуждение результатов и выводы

В диссертации представлен новый метод, как в теории, так и в эксперименте, позволяющий значительно увеличить амплитуды колебаний в УЗКС стержневого типа. Важно отметить, что этот метод не заменяет традиционные средства увеличения амплитуд колебаний с использованием концентраторов, а скорее дополняет их. На практике комбинация обоих подходов была интегрирована в установку для ППД с ультразвуком.

Предлагаемый метод имеет ограничения. Основным недостатком этой ультразвуковой схемы является ее высокая чувствительность к импедансу, что создает проблемы при точной настройке для достижения максимальной амплитуды. Эта чувствительность к импедансу напрямую связана с минимальными потерями схемы, что приводит к полосе пропускания всего 16 Гц.

Несмотря на недостатки, потенциальное применение описанных УЗКС в ППД с ультразвуком очевидно, особенно при использовании современных систем автоматической настройки, однако, эти системы требуют специальной адаптации конструкции к технологическому оборудованию УЗО ППД.

Результаты показывают значительное снижение эквивалентного коэффициента потерь за счет эффективного выбора соединительного элемента между преобразователем с высокими потерями и инструментом с низкими

потерями. Снижение почти равно коэффициенту потерь инструмента, что означает, что он снизился более чем в десять раз. Поскольку амплитуда колебаний и коэффициент потерь имеют обратную зависимость, ожидается кратное увеличение амплитуды.

Небольшой поперечный размер соединительного элемента может вызвать потенциальные изгибные колебания [87-89]. При продольном возбуждении эти колебания могут привести к потере динамической устойчивости. Чтобы предотвратить это, необходимо увеличить жесткость соединительного элемента, например за счет конструкции и избежать возможности параметрического резонанса, который имеет решающее значение для поддержания стабильности системы.

К основным результатам исследований УЗКС необходимо отнести:

- теоретические и экспериментальные исследования показали, что амплитуды колебаний стержневых колебательных систем могут быть значительно увеличены путем выбора элемента связи, который соединяет преобразователь с высокими потерями и волновод-инструмент с малыми потерями.

- экспериментальные результаты подтверждают теоретические выводы и предложенные гипотезы.

- сложная природа тонкой настройки высокочастотных колебательных систем создает проблемы в достижении точного соответствия между теоретическими прогнозами и практической реализацией, что необходимо учитывать при разработке УЗКС для ППД.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Результаты исследования ППД с ультразвуком

В исследовании использовались образцы цилиндров из конструкционной стали 45 и Ст3, которые были обработаны в соответствии с технологией заводского изготовления, например, штоков гидроцилиндров, цилиндрических направляющих, оси коромысел, оси и штанг толкателей ДВС. Обработка включала ТВЧ с последующим шлифованием рабочей поверхности, что повторяет технологию, используемую на практике для изготовления подобных деталей.

Обработка образцов производилась в соответствии со схемой представленной на рис. 4.1, обеспечивающий импульсный режим передачи ультразвуковой энергии от инструмента-индентора к обрабатываемой поверхности.

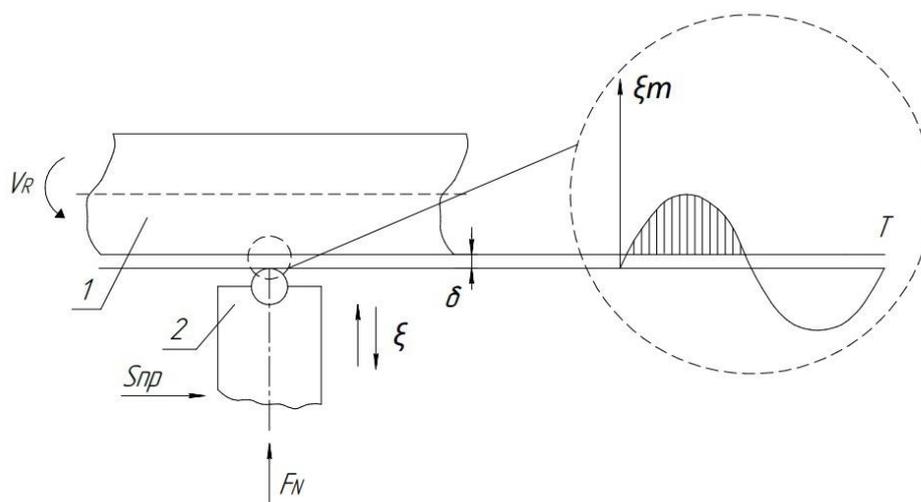


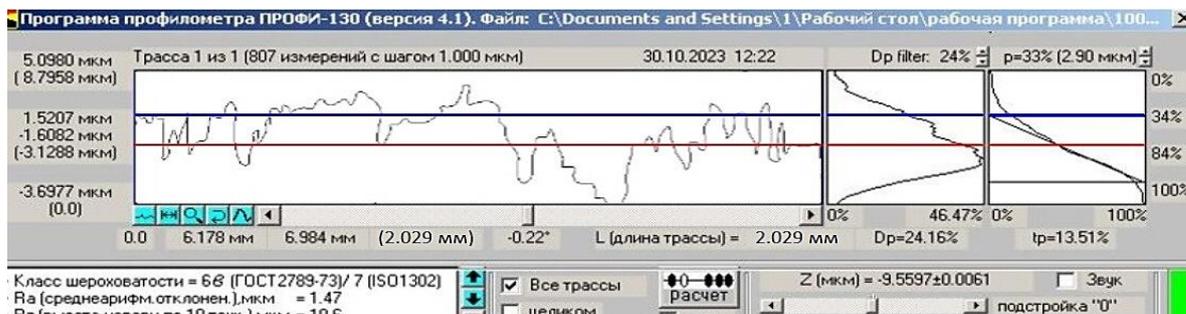
Рис. 4.1. Принципиальная схема ультразвукового упрочнения
1- вращающаяся деталь, 2 – инструмент-индентор, V_R – скорость обработки, $S_{ПР}$ – продольная подача, ξ_m – амплитуда колебаний δ - зазор между инструментом и поверхностью детали, F_N – сила прижима.

Образцы соответствовали рекомендуемым формам и размерам образцов типа "вал", приведенным в руководстве по эксплуатации фрикционной машины УМТ-2168 "Унитриб". В экспериментах использовались втулки из серого чугуна СЧ-18, которые соответствовали рекомендуемым размерам для данного оборудования.

Как уже отмечалось ранее [90], на функциональные характеристики деталей существенное влияние оказывают геометрические параметры их рабочих поверхностей. Комплексным показателем качества поверхности изделия служит шероховатость, которая соответствует рекомендациям, изложенным в ГОСТ 2789-73 [91].

На рисунке 4.2 представлены профилограммы поверхности предварительно закаленных и шлифованных образцов стали 45 до и после ультразвуковой обработки. Обработка существенно изменяет текстуру поверхности, в результате чего формируется более регулярный рельефный рисунок со значительным уменьшением средней высоты выступов и впадин. R_a при указанных условиях обработки уменьшается с 0,63 до 0,16 мкм, а опорная длина $t_{0,5}$ увеличивается с 50 до 80 %.

Представленные на рис. 4.2, 4,3 результаты подтверждают исследования, сделанные ранее [92, 93] для других материалов. Анализируя данные рисунков необходимо отметить, что шероховатость, в первую очередь, зависит от силы прижима F_N и амплитуды колебаний ξ_m , влияющими на эффективность ультразвуковой упрочняющей обработки [93].



а)



б)

Рис. 4.2. Профилограммы поверхности образцов из стали 45 до (а) и после (б) ультразвуковой обработки

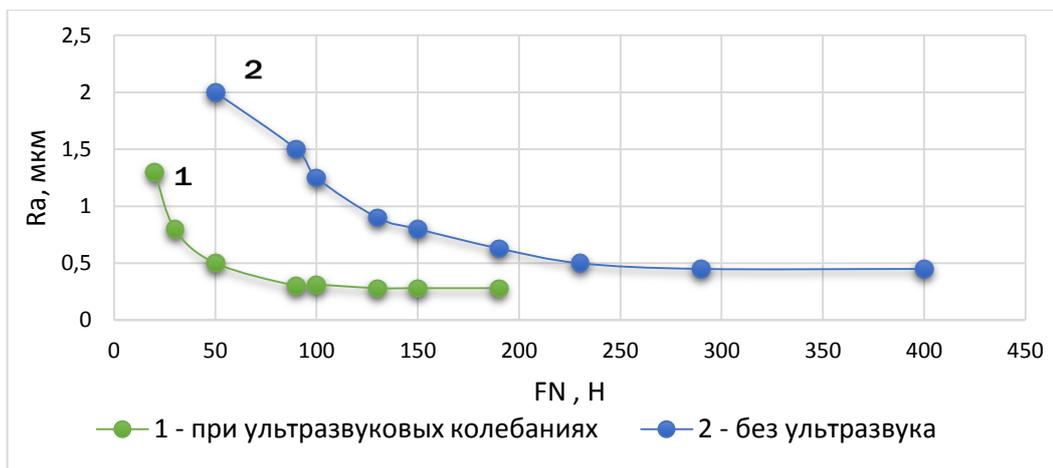


Рис. 4.3. Зависимость высоты неровностей Ra на образцах из стали 45 от силы прижима F_N деформирующего элемента с радиусом головки $R_r = 5$ мм без ультразвука (1) и при ультразвуковых колебаниях с $\xi_m = 12$ мкм (2)

Исследование связи между Ra и силой прижима при различных методах ППД является традиционным, например, исследования, приведенные в [94, 95], показали, что при алмазном выглаживании Ra уменьшается по мере увеличения силы прижима F_N . Аналогичная тенденция (см. рис. 4.3), как показали наши эксперименты, наблюдается и при ультразвуковом воздействии инструмента, но при значительно меньших усилиях - примерно в 2-4 раза меньше, чем при алмазном выглаживании. Эта разница позволяет снизить среднюю деформацию обрабатываемых деталей и тем самым повысить точность обработки.

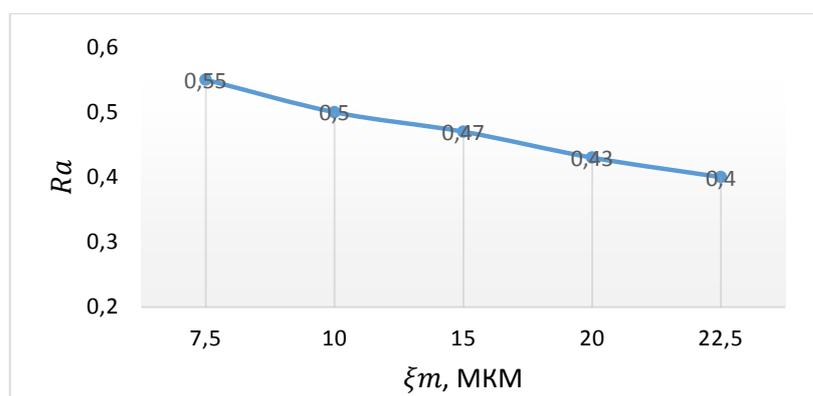


Рис. 4.4. Зависимость средней высоты микронеровностей Ra от амплитуды колебательных смещений ξ_m

На рисунке 4.3 показано, что для образцов из стали 45 при $F_N = 100$ Н шероховатость поверхности претерпевает минимальные изменения, оставаясь в диапазоне $Ra = 0,8-0,4$ мкм (первоначально $Ra = 2,5-1,25$ мкм). Увеличение

амплитуды колебательных смещений и уменьшение силы прижима приводит к уменьшению шероховатости (см. рис. 4.3).

Связь между высотой неровностей, F_N и ξ_m указывает на то, что степень пластической деформации при ультразвуковом упрочнении коррелирует с пиковыми напряжениями, сопровождающими импульсную ультразвуковую обработку, определяемую величиной $F_N * \xi_m$.

Важно отметить, что значения R_z и R_a не полностью отражают изменения в геометрии поверхности, которые существенно влияют на характеристики деталей. Также важна опорная длина tp профиля. На рисунках 4.4 и 4.5 показано, как амплитуда смещений при УЗО термообработанных образцов стали 45 влияет на R_a . В обработке использовался шарик диаметром 9,5 мм при $F_N = 100$ Н, $n = 12,5$ об/мин, $S_z = 0,07$ мм/об и $f = 18,7$ кГц. Увеличение амплитуды уменьшает шероховатость, в частности R_a , аналогично ультразвуковому алмазному выглаживанию.

Анализируя кривые (рис. 4.5) можно сделать вывод, что одинаковый класс чистоты различно обработанных поверхностей, позволяет получить разную величину фактической обработанной поверхности. Если после шлифования на уровне сечения $P = 40-50\%$, $tp = 30-50\%$, то после импульсного ультразвукового упрочнения на том же уровне сечения оно составляет $tp = 75-80\%$, а в некоторых случаях даже больше, т.е. после ультразвукового упрочнения при различных комбинациях ППД с ультразвуком в 2 – 2,5 раза больше величина обработанной поверхности, чем после шлифования, что является косвенным доказательством увеличения износостойкости деталей.

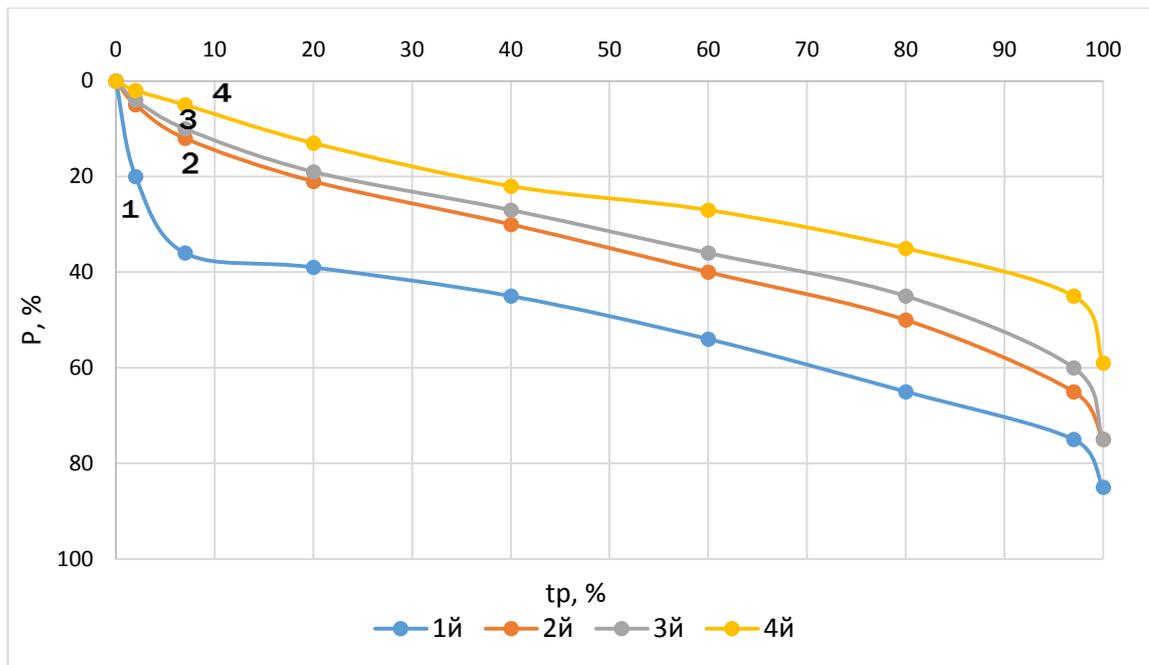


Рис. 4.5. Кривые относительной опорной длины профиля t_p термообработанных образцов из стали 45 после УЗО в зависимости от уровня сечения P , % при разной амплитуде ξ_m : 1 – $\xi_m = 0$ (исходный шлифованный образец); 2 – $\xi_m = 10$ мкм; 3 – $\xi_m = 15$ мкм; 4 – $\xi_m = 20$ мкм

Помимо амплитуды колебательных смещений ξ_m и силы прижима F_N , результирующая шероховатость поверхности после УЗО зависит и от других факторов: начальной шероховатости Ra [22, 30, 39, 96], скорости вращения V_R , подачи S_z , радиус инструмента R и количества проходов i . Исследования, изложенные в [97-99], подробно рассматривают зависимость от этих факторов. Для большинства материалов эффективность ультразвуковой обработки очевидна даже при начальных значениях Ra в диапазоне от 10 до 20 мкм [30, 100].

Экспериментально наблюдаемая зависимость между Ra и подачей S_z при ультразвуковой обработке имеет тот же характер, что и при традиционных методах выглаживания:

$$Ra = q \frac{S_z^2}{R} \quad (4.1)$$

Отличительная особенность заключается в том, что при одинаковых силах прижима F_N УЗО приводит к снижению шероховатости поверхности, что согласуется с нашим пониманием пластической деформации при колебаниях ультразвукового инструмента.

Микроструктура поверхностного слоя стали 45 изучалась с помощью микроскопа Neophot – 21, а микротвердость с применением ПМТ -3.

На рис. 4.6 показана исходная структура образца из стали 45, которая состоит из перлита и феррита.



Рис. 4.6. Микроструктура стали 45 в исходном состоянии (×400)

Микроструктура стали 45 после ультразвуковой обработки приведена на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Микроструктура стали 45 после ультразвуковой обработки (×400)

Изображения микроструктуры отчетливо показывают изменения поверхности исследуемого образца, демонстрируя очевидные изменения размера зерен и морфологии после ультразвуковой обработки по сравнению с необработанным металлом. В поверхностном слое пластически деформированного металла происходит заметное выравнивание зерен, формирующее текстуру деформации. Такое выравнивание является результатом ориентации зерен в основном направлении деформации, о чем свидетельствуют микроструктурные особенности, наблюдаемые на наклепанном слое (рис. 4.7).

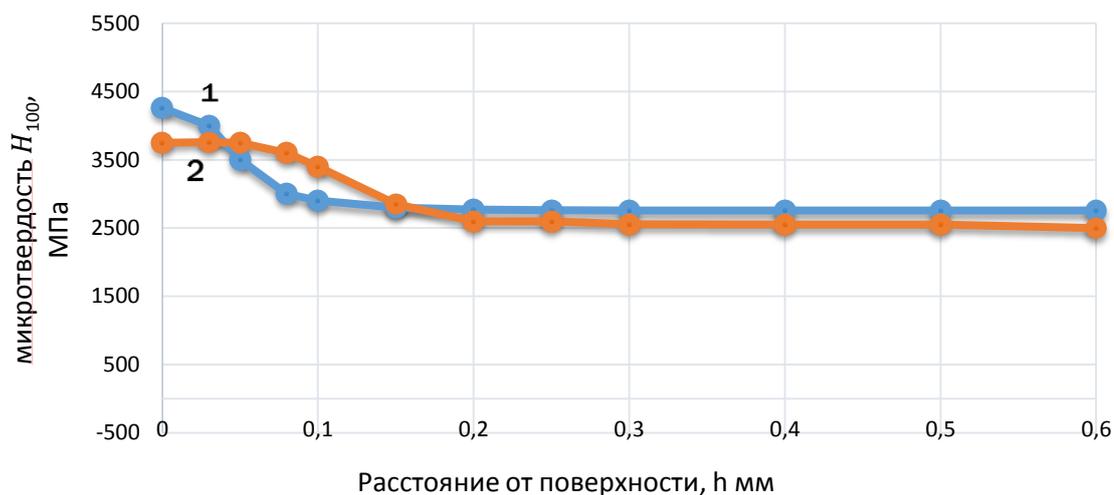


Рис. 4.8. Изменение микротвердости H_{100} по глубине слоя образца из стали 45 после ультразвуковой обработки.

1- $F_N = 50\text{Н}$; 2 – $F_N = 100\text{Н}$.

Режимы обработки: $n = 80$ об/мин; $S = 0,07$ мм/об; $\xi_m = 10\text{мкм}$; $f = 18$ кГц; $d_{\text{шр}} = 15\text{мкм}$

Изменение микротвердости незакаленного образца из стали 45, подвергнутого ультразвуковой обработке, приведено на рис. 4.8. Результаты исследований показали, что при ультразвуковой обработке незакаленной стали 45 имеет место увеличение микротвердости поверхностного слоя в 1,6 раза, а глубина упрочнения составляет 0,15-0,6 мм.

Высокая эффективность ультразвуковой упрочняющей обработки незакаленной стали 45 подтверждается данными других исследователей [101, 102, 103].

В процессе обработки величина деформирования снижается по мере удаления от контактной поверхности. Следовательно, процессы размножения дислокаций, дробление кристаллов на блоки и другие сопутствующие явления, сопровождающие упрочнение, носят затухающий характер и наиболее упрочненной оказывается верхняя часть пластически деформированного слоя.

4.2. Структурные изменения поверхности материала после ППД с УЗО

Процессы поверхностной пластической деформации всегда приводят к возникновению остаточных напряжений из-за процесса деформации и

одновременного термического воздействия [104, 105]. Увеличение плотности дислокаций вызывает небольшое увеличение удельного объема деформируемого поверхностного слоя. В результате это расширение создает напряжение сжатия во внешних слоях и напряжение растяжения во внутренних слоях, что уравнивает структуру материала.

Характеристики остаточных напряжений существенно влияют на эксплуатационные характеристики деталей [94, 106]. Однако влияние этих напряжений на износостойкость деталей остается спорным среди исследователей. Одни утверждают, что растягивающие остаточные напряжения способствуют снижению износа, другие - что сжимающие напряжения повышают износостойкость [107-109]. Напротив, некоторые исследования показывают, что остаточные напряжения, независимо от их природы, могут не оказывать существенного влияния на износостойкость [22, 44, 110].

Сжимающие остаточные напряжения заметно повышают усталостную прочность деталей, в то время как растягивающие напряжения оказывают противоположное влияние, снижая ее [111, 112]. Полученные нами экспериментальные данные подтверждают, что возникновение сжимающих остаточных напряжений является отличительной чертой УЗО, что характерно для различных методов поверхностной пластической деформации. Также были произведены исследования природы этих остаточных напряжений, возникающих как при обычной, так и при ультразвуковой обработке поверхности. Все исследованные образцы демонстрируют сжимающие остаточные напряжения. На рисунке 4.9 показано распределение остаточных напряжений по глубине при традиционной технологии (алмазное выравнивание) и ультразвуковой обработке поверхности. Ультразвуковые колебания в деформируемом теле позволяют значительно снизить силу прижима F_N .

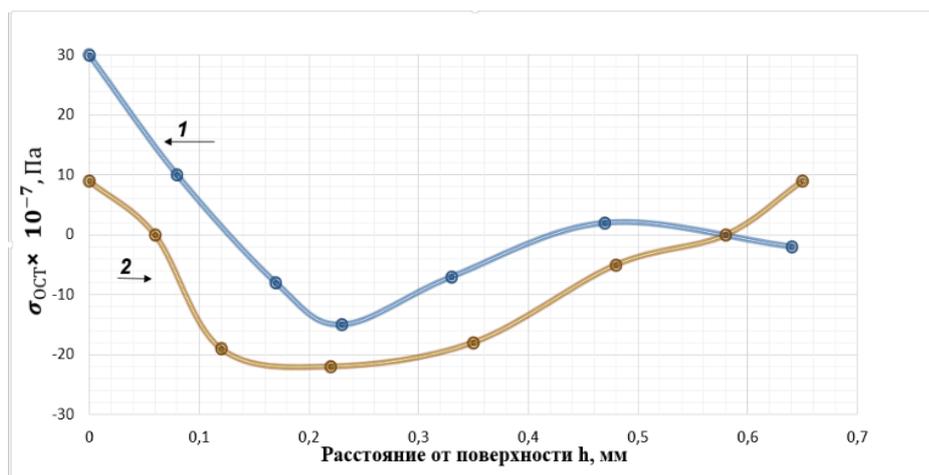


Рис. 4.9. Остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ по глубине слоя h в закаленной стали 45 до упрочнения (1) и после упрочнения ультразвуковым инструментом (2)

В ходе исследования было проанализировано распределение макро- и микронапряжений по глубине стальных образцов после ультразвуковой обработки. В экспериментах изменялись параметры, такие как амплитуда смещения концентратора колебаний ξ_m , сила прижима F_N и продолжительность обработки t . Рентгеновский метод был использован для оценки напряжений внутри образцов путем определения параметра ячейки кристаллической решетки a , который коррелирует с суммарными первичными напряжениями.

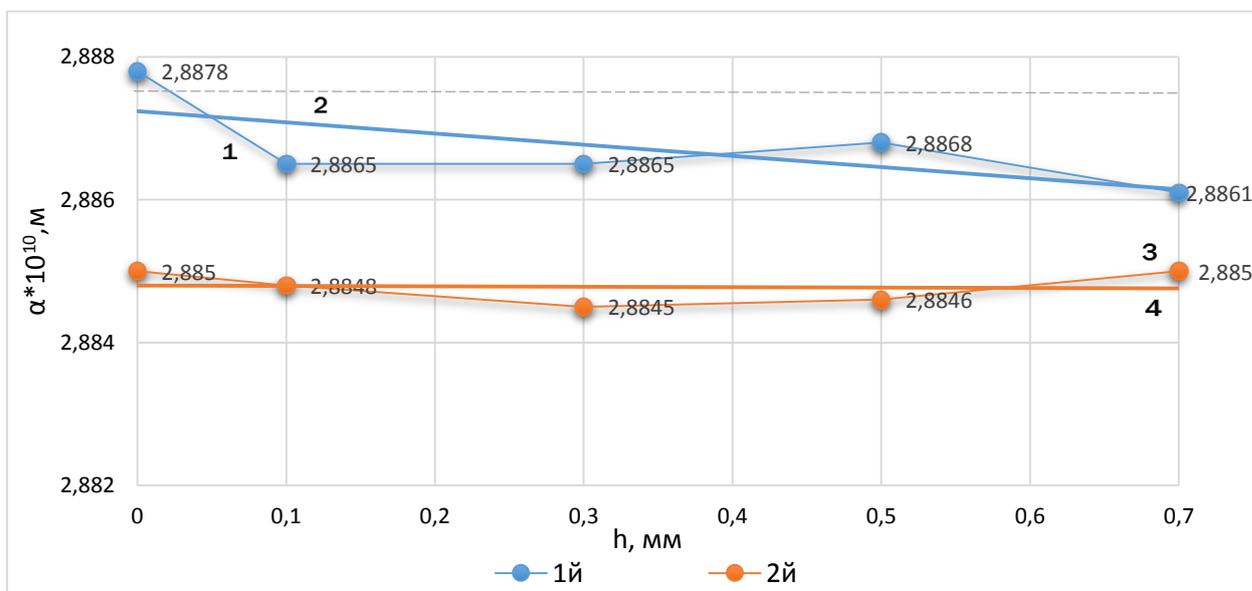


Рис. 4.10. Изменение решетки a (1,2) и уширения линии β (3,4) по глубине деформированного слоя при режимах ультразвуковой обработки $\xi_m = 12$ мкм, $F_N = 80-150$ Н (1,3) и $\xi_m = 18$ мкм, $F_N = 60$ Н (2,4)

На рисунке 4.10 показаны результаты эксперимента. Пунктирная линия представляет начальное значение кристаллической решетки a перед обработкой. На графике показаны минимальные растягивающие напряжения в тонком поверхностном слое, которые находятся в пределах погрешности измерения. Остаточные сжимающие напряжения достигают максимума на глубине 0,2 мм и затем уменьшаются с увеличением глубины. Параметр решетки изменяется в зависимости от глубины упрочненного слоя, уширение дифракционной линии происходит из-за уровней ультразвуковых напряжений. Эти уровни напряжения пропорциональны произведению F_N и ξ_m .

Изменение параметра кристаллической решетки и уширение линии β демонстрируют сходное поведение при эквивалентных значениях $F_N \xi_m$, что указывает на корреляцию между пластической деформацией и основными параметрами режима F_N и ξ_m . Рентгенографический анализ показывает, что уширение линий является наибольшим на поверхности образца и уменьшается с увеличением глубины. Повышенные амплитуды колебательных смещений как и силы прижима соответствуют увеличенному уширению линий, что указывает на усиление искажений в кристаллографической решетке из-за ультразвуковой обработки.

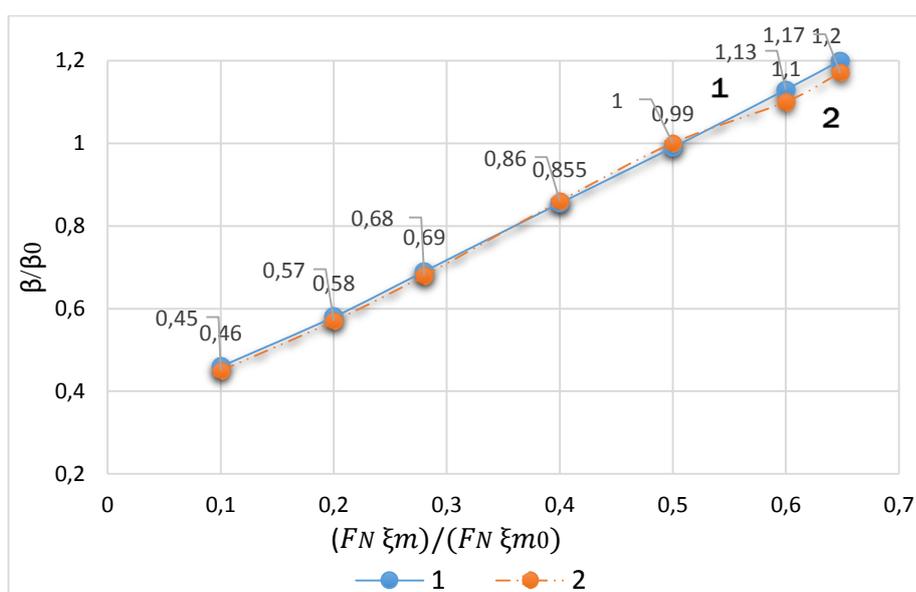


Рис. 4.11. Зависимость истинной ширины дифракционной линии β от величины $F_N \xi_m$ при изменении амплитуды ξ_m (1) или силы прижима F_N (2)

Сопоставление относительного увеличения истинной ширины дифракционной линии на поверхности образца (рис. 4.11) с относительным изменением амплитуды при постоянном значении F_N (1) и относительным изменением параметра $F_N \xi_m$ (2) показало, что зависимость β / β_0 от $F_N \xi_m$ аппроксимируется уравнением вида (4.2).

$$F_{max} = k F_N^p \xi_m^q \quad (4.2)$$

Таким образом основным технологическим фактором, влияющим на упрочнение при ультразвуковой обработке, является произведение $F_N \xi_m$.

Результаты металлографических исследований образцов из стали 45, подвергнутых термообработке ТВЧ и последующей ультразвуковой обработке при различных режимах приведены на рис. 4.12, 4.13.

Микроструктура исходного образца из стали 45 термообработанного ТВЧ, приведенная на рис. 4.12 состоит из 3-х зон

I – зона – мартенсит закалки

II – зона – мартенсит + феррит (переходная зона)

III – зона – перлит + феррит (сердцевина образца)

Глубина закаленного слоя составила 2 мм.

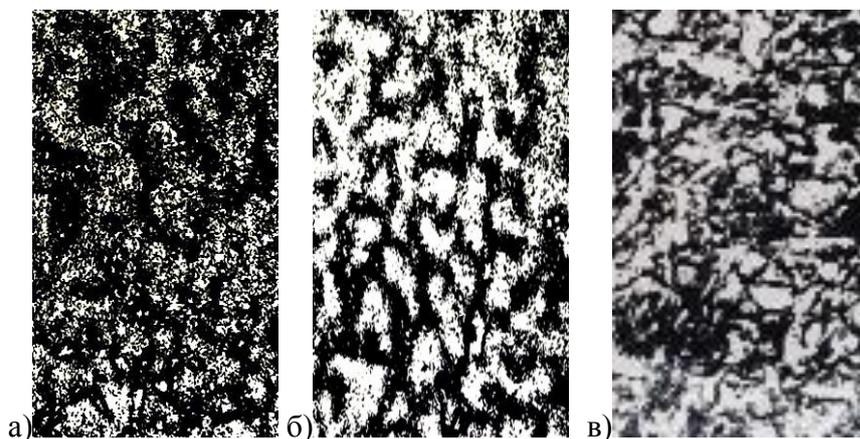


Рис. 4.12. Микроструктуры поверхностного слоя закаленной стали 45 и последующей НпрУЗО ($\times 500$):

а) I – зона; б) II – зона; в) III – зона

Металлографическое исследование не выявило заметных различий в микроструктурах поверхности закаленной и незакаленной ТВЧ стали 45, подвергнутыми ультразвуковой обработке. Наблюдаемая структура

преимущественно мартенситная. Для дальнейшего исследования видимых изменений потребуется использование электронного микроскопа.

Рентгеноструктурный анализ поверхностного слоя образцов выявил увеличение линий α -фазы и последующее уменьшение толщины линий γ -фазы, что указывает на структурные изменения. Однако явных фазовых превращений выявлено не было.

На рис. 4.13 видно незначительное изменение структуры в зависимости от числа проходов. Видимо по той причине, что существует практически предел деформации, при котором пластическая деформация прекращается.

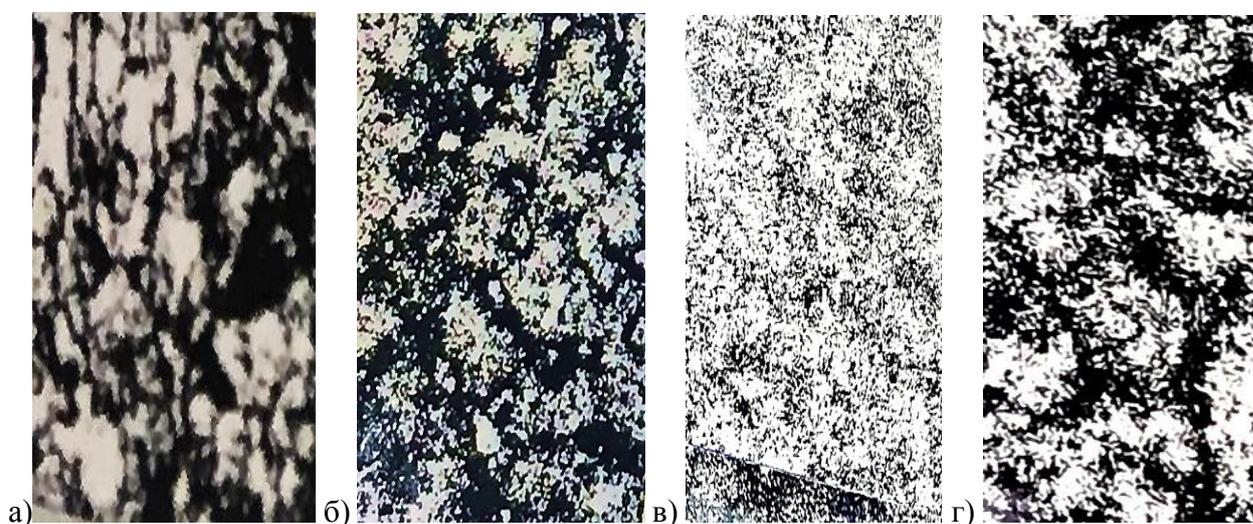


Рис. 4.13. Микроструктура закаленной стали 45 и последующей ИУЗО ($\times 400$): а) закалка ТВЧ; б) одним проходом; в) тремя проходами; г) пятью проходами

Исследование влияния количества проходов i ($i = 1 \dots 6$) показало, что увеличение их числа после $i = 1$ не оказывает существенного влияния на шероховатость и на величину микротвердости.

4.3. Влияние ППД с УЗО на износостойкость

Одним из ключевых параметров оценки качества детали при эксплуатации является износостойкость.

Для оценки износостойкости при ультразвуковом ППД была проанализирована длина следов деформации на полированных и закаленных образцах. Износостойкость отполированных образцов служила эталоном для оценки влияния силы прижима. Как указано в таблице 4.1, износостойкость

демонстрирует тенденцию к возрастанию с увеличением силы прижима во время ультразвуковой обработки при сохранении постоянной амплитуды в 5 мкм.

Результаты показали, что после обработки УЗО износостойкость образцов увеличилась примерно на 66 %. После обработки УЗО средний износ поверхностного слоя уменьшился с 2,08 мкм до 1,21 мкм. Полный обзор результатов эксперимента приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Увеличение износостойкости при ультразвуковой обработке

Материал	Сила прижима F_N , Н	Глубина канавки на поверхности образца, $\frac{h_{(2)}}{h_{(1)}}$
Сталь 45	50	1,22
	100	1,45
	150	1,49
Ст3	50	1,11
	100	1,34
	150	1,45

Появление наклепа и изменение микрорельефа поверхности, создание сжимающих напряжений в результате использования ультразвуковой обработки ведет к снижению износа на поверхности. Это способствует увеличению усталостной прочности, что является общей характеристикой обработок, включающих поверхностную пластическую деформацию. На рисунке 4.14 показаны кривые усталости, наблюдаемые в образцах из стали 45 и Ст3, подвергнутых обычной полировке, поверхностной пластической деформации с использованием алмазного инструмента и ультразвуковой обработке. В таблице 4.2 приведены значения условного предела выносливости σ_N для образцов из стали 45 при определенном количестве циклов нагружения. Сравнительный анализ показывает, что ультразвуковая обработка обеспечивает дополнительное повышение предела выносливости по сравнению с другими методами поверхностного упрочнения.

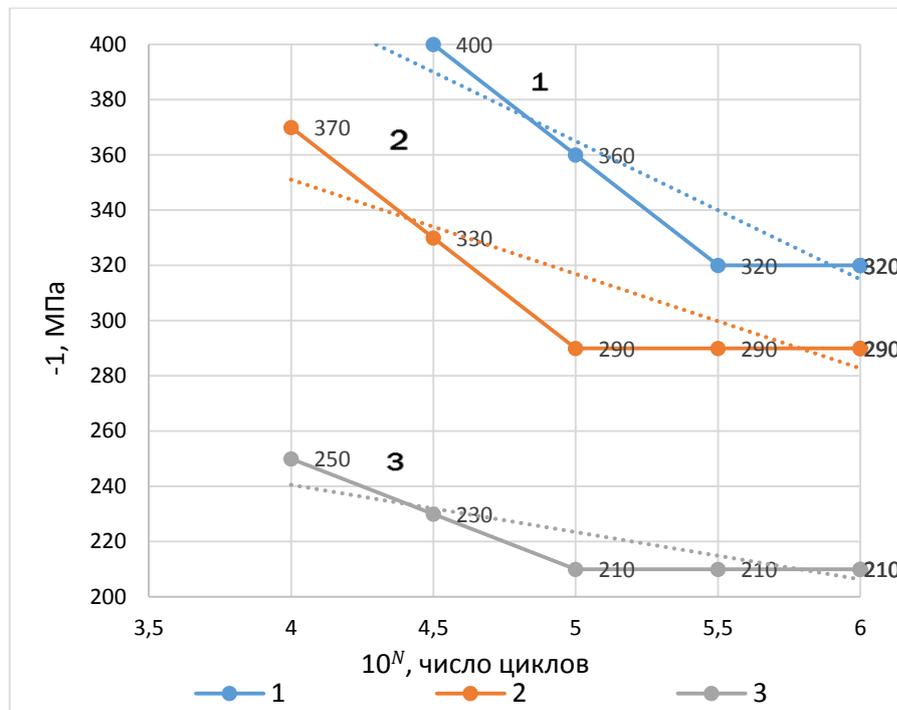


Рис. 4.14. Кривые усталости образцов из стали 45: 1 – при полировании; 2 – при обычном выглаживании ($F_N = 200$ Н); 3 – при ультразвуковом выглаживании ($F_N = 75$ Н; $\xi_m = 12$ мкм)

Таблица 4.2

Условный предел выносливости стали 45 после различных видов обработки

Вид обработки	σ_N , МПа при $N = 10^5$
Полирование	25
Обычное выглаживание	34
Ультразвуковое выглаживание	41

По результатам анализа данных из таблицы 4.2 можно сделать вывод, что наибольший показатель по пределу выносливости после импульсной ультразвуковой обработки, а это влечет к более продолжительной эксплуатации поверхности детали без изнашивания.

В табл. 4.3 приведены сравнительные результаты, полученные при обычном выглаживании стали 45 и импульсной ультразвуковой обработкой тем же инструментом.

**Основные характеристики, полученные в результате
выглаживания и ППД с УЗО**

Показатели качества поверхности	Вид обработки	
	ППД без ультразвука (выглаживание)	ППД с ультразвуком
Шероховатость Ra , мкм (исходная – $Ra = 10..2,5$ мкм)	0,63..0,24	0,16
Степень упрочнения (наклепа), %	1,06	1,49
Остаточные напряжения, МПа	от 300 до -150	от 100 до -210
Относительная износостойкость, %	45-56	66-81

Таким образом, износостойкость и усталостная прочность поверхностного слоя детали являются решающими факторами, влияющими на эксплуатационные характеристики, что в том числе косвенно подтверждается работами [22, 44]. На эти показатели влияют шероховатость поверхности, глубина слоя, степень пластической деформации, величина остаточных напряжений и толщина слоя.

С использованием методов математического планирования экспериментов [72] были получены уравнения регрессии для шероховатости и поверхностной микротвердости при ультразвуковом ППД, на основе которых были определены оптимальные режимы ППД с ультразвуком, представленные в таблице 4.4.

Оптимальные режимы, и характеристики УЗО

Сталь	Оптимальные режимы обработки			Характеристики обработки	
	F_N , Н	ξ_m , мкм	V_R , м/мин	Ra , мкм	H, МПа
Ст3	100	13	7	0,13	2800
45	140	13	6	0,14	5000
40X	140	13	6	0,18	3500
38ХМЮА	100	13	7	0,15	8700

С целью построения математической модели зависимости микротвердости по глубине образца был использован метод наименьших квадратов. Математическая модель описывается уравнением степенного вида. Расчеты проводились по программе, написанной на алгоритмическом языке Visual Basic для ЭВМ «Расчет поверхностно-пластического деформирования с ультразвуком по заданным параметрам», разработанная автором [73]. Проведенные расчеты показали, что математическая модель адекватно описывает экспериментальные данные параболой 4 порядка. Адекватность математической модели экспериментальным данным проверялась по критерию Фишера.

Таблица 4.5

Математическая модель H_{100} от глубины обработанного слоя импульсной УЗО

Вид обработки	Математическая модель
Импульсная ультразвуковая обработка $\xi_m = 10\text{мкм}$, зазор = 0,03	$H_{100} = -513,3X^4 + 482,637X^3 + 3096,25X^2 - 5578,06$

Математическая модель позволяет рассчитывать величину микротвердости образцов, обработанных образцов ППД с ультразвуком в импульсном режиме и прогнозировать глубину изменения микротвердости.

4.4. Азотирование с ультразвуком

Широко используемым методом целенаправленного изменения свойств поверхностного слоя стали является азотирование [113, 114]; процесс, включающий диффузию азота при повышенной температуре для увеличения твердости детали и износостойкости.

Вместе с тем азотирование имеет и существенные недостатки:

1. Ограниченная толщина измененных зон;
2. Существенное несоответствие между твердостью нитридного слоя и основного материала, повышающее вероятность растрескивания поверхностного слоя при воздействии локализованных нагрузок;

3. Сложность получения высокой твердости модифицированного слоя при азотировании низкоуглеродистых сталей, связанная с отсутствием в получаемом слое высокотвёрдых нитридов легирующих элементов.

4. Большое время процесса азотирования.

Известно [115], что наложение ультразвуковых колебаний позволяет сократить время азотирования более чем в 2 раза.

Значительный интерес представляет исследование комбинированной обработки, включающей азотирование стали с последующим ультразвуковым ППД. Эта последовательная обработка была выбрана из-за того, что процесс азотирования протекает при температурах, превышающих порог рекристаллизации, что устраняет эффект наклепа, наблюдаемый в последовательности "азотирование + ППД".

Для экспериментов были изготовлены цилиндрические образцы из стали Ст3, выбранной в качестве модельного материала, диаметром 10 мм и высотой 20 мм. Были определены четыре вида образцов: 1 – контрольные образцы, 2 – азотированные образцы, 3 – образцы после ультразвукового ППД, 4 – азотированные образцы с последующим ультразвуковым ППД. Все образцы перед обработкой подвергались нормализации.

Азотирование проводили в насыщающей среде, содержащей 50% NH₃ и 50% воздуха, с изотермической выдержкой при температуре 570°C в течение 1 часа. Экспериментальные исследования азотирования с ультразвуком приводились в соответствии со схемой показанной на рис. 4.15.

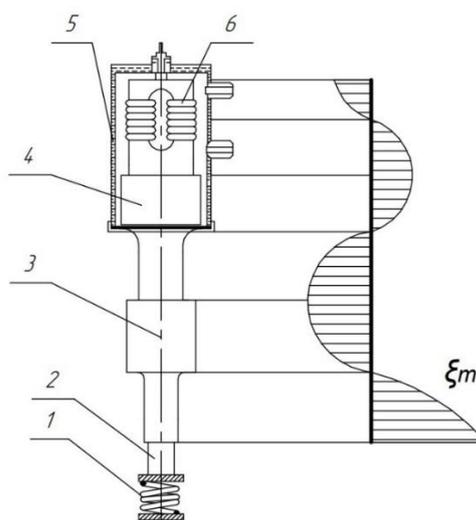


Рис. 4.15. Схема ультразвукового ППД: 1 – основание с пружиной; 2 – образец; 3 – излучатель; 4 – волновод; 5 – кожух охлаждения; 6 – преобразователь

Торец излучателя 3 стержневой трёхполуволновой магнестрикционной колебательной системы прижимался к образцу 2, расположенному на основании 1. Питание колебательной системы осуществлялось от ультразвукового генератора УЗГ 2,0/22. Параметры обработки: усилие прижима $F_N = 25$ Н, время обработки $t = 10$ с, амплитуда колебаний торца излучателя $\xi_m = 12$ мкм, частота колебаний $f = 19700$ Гц [116].

Микроструктурный анализ проводился с помощью светового микроскопа Carl Zeiss Axiovert 25 CA, измерения микротвердости осуществлялись тестером микротвердости AFFRI Dm - 8. Оценка внутренних остаточных напряжений проводилась электронографическим методом, основанным на эффекте Кирлиана, с использованием специального оборудования, разработанного в МАДИ [117]. Этот метод основан на эффекте короны, при котором электрод, заряженный примерно до 50 000 В, вызывает ионизацию соседних молекул воздуха. Этот ионизированный воздух испускает световое излучение в различных спектрах: - видимом, ультрафиолетовом и инфракрасном - при пропускании через него тока. Когда источник высокого напряжения заряжает тело, излучаемый заряд создает свечение, выявляя зоны внутри объекта, подверженные различным уровням внутреннего остаточного напряжения. Этот метод позволяет

идентифицировать области внутри образца, которые подвержены различным степеням внутреннего остаточного напряжения при сжатии или растяжении. Дальнейший анализ субструктуры образца был проведен с помощью атомно-силовой микроскопии с использованием сканирующего мультимикроскопа SMM-2000.

Твёрдость образцов в зависимости от способа обработки и глубины измерения представлена на рис. 4.16.

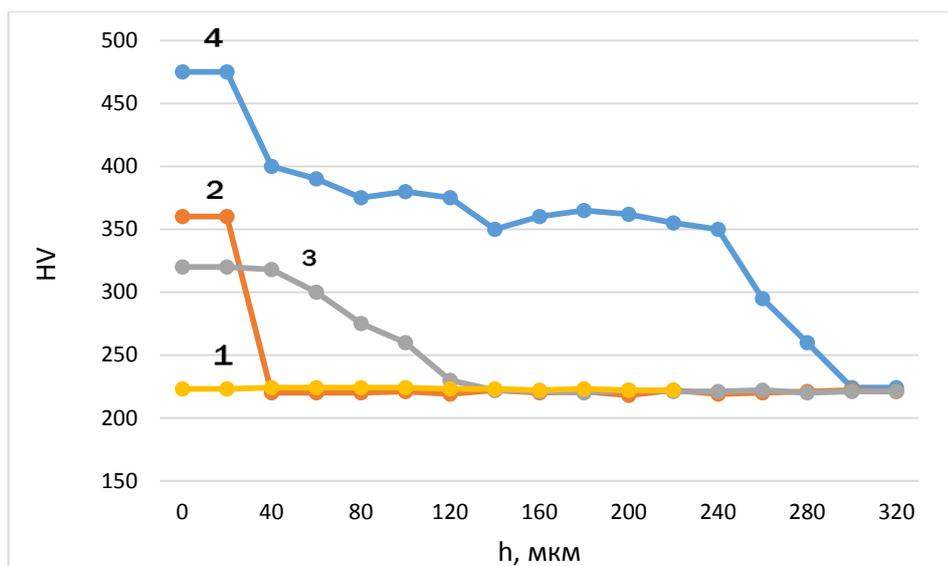


Рис. 4.16. Твёрдость образцов из углеродистой стали в зависимости от глубины измерения: 1 – без обработки; 2 – после азотирования; 3 – после ультразвукового ППД; 4 – после азотирования с последующим ультразвуковым ППД.

Твёрдость до обработки составляет 210 HV и практически не изменяется при увеличении глубины измерения.

Твердость на поверхности после азотирования возрастает до 365 HV. Полученный слой толщиной 20 мкм представляет собой монокристалл из керамики (70% $Fe_4N+30\% Fe_3O_4$), под монокристаллом твердый раствор этих же керамик в $\alpha-Fe$. С увеличением глубины с 20 до 40 мкм происходит резкое уменьшение твердости до исходного значения.

Ультразвуковое ППД приводит к увеличению твердости на поверхности до 329 HV. Данное значение твердости сохраняется на глубину 40 мкм, после чего начинается монотонное уменьшение и достижение исходного значения при 140 мкм.

Максимальный эффект как по величине упрочнения, так и по глубине упрочненного слоя получен в результате азотирования и последующего ультразвукового ППД. Анализ кривой 4 показывает, что твёрдость на поверхности при силе прижима 150 Н возросла до 475 HV. Далее на глубине с 30 до 40 мкм происходит снижение до 405 HV, после располагается относительно ровный участок до 240 мкм на котором происходит незначительное снижение твёрдости до 350 HV. На участке с 240 до 300 мкм происходит уменьшение твёрдости до начального уровня.

Таким образом, поверхностный слой, полученный по предлагаемой комбинированной технологии (азотирование + ППД с УЗО), отличается от способов, используемых в комбинации с обычным ППД, как по величине твёрдости, так и по глубине упрочнения. При этом усиливаются положительные свойства за счет воздействия ультразвука в приповерхностные слои и уменьшаются отрицательные свойства комбинируемых способов, сглаживая перепад между слоями. Так по сравнению с классическим азотированием или ультразвуковым ППД получено относительно высокое значение твёрдости для низкоуглеродистой стали, более чем в 2 раза снижена твёрдость на границе азотированного слоя, до 2 раз увеличена глубина упрочнения.

Возрастание твёрдости объясняется ультразвуковым упрочнением азотированного слоя, а увеличение глубины связано с повышением эффективности передачи и распространения ультразвуковой энергии в образцах.

В результате исследований по комбинированию способов повышения твёрдости поверхностного слоя стальных изделий, основанных на различных механизмах упрочнения, предложена технология комбинированной обработки, представляющая собой азотирование с последующим ультразвуковым ППД. Данный способ упрочнения приводит к повышению твёрдости на поверхности на 50%, уменьшает резкий перепад на границе азотированного слоя и обеспечивает увеличение глубины упрочнения в 2 раза.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ППД

5.1. Сравнительная характеристика комбинированных способов ППД

С целью определения эффективности различных способов ультразвукового ППД было проведено сравнительное исследование следующих вариантов обработки закаленной стали 45.

1. ТВЧ + шлифование;
2. Ультразвуковая обработка при непрерывной передаче энергии колебаний (НпрУЗО);
3. Импульсная ультразвуковая обработка (ИУЗО);
4. Комбинация НпрУЗО с последующей импульсной обработкой (ИУЗО);
5. ИУЗО с предварительным нагревом материала токами высокой частоты (ТВЧ).

Первый вариант осуществлялся для сравнения, остальные четыре – представляют различную комбинацию обработки с ультразвуком.

Схема НпрУЗО заключается в следующем: деталь вращается с окружной скоростью V , инструмент в виде шарика колеблется с ультразвуковой частотой и прижимается к обрабатываемой детали силой (F_N) с тем, чтобы обеспечивался непрерывный контакт между ними. ИУЗО отличается тем, что между инструментом-шариком, свободно сидящем в специальном гнезде излучателя и обрабатываемой поверхностью создается зазор. Обработка предварительно нагретого образца, отличается от других УЗО тем, что обрабатываемая деталь предварительно нагревается затем подвергается ИУЗО.

На рис. 5.1 приведены экспериментальные кривые распределения микротвердости H_{100} по глубине слоя термообработанных ТВЧ образцов из стали 45 после различных схем УЗО.

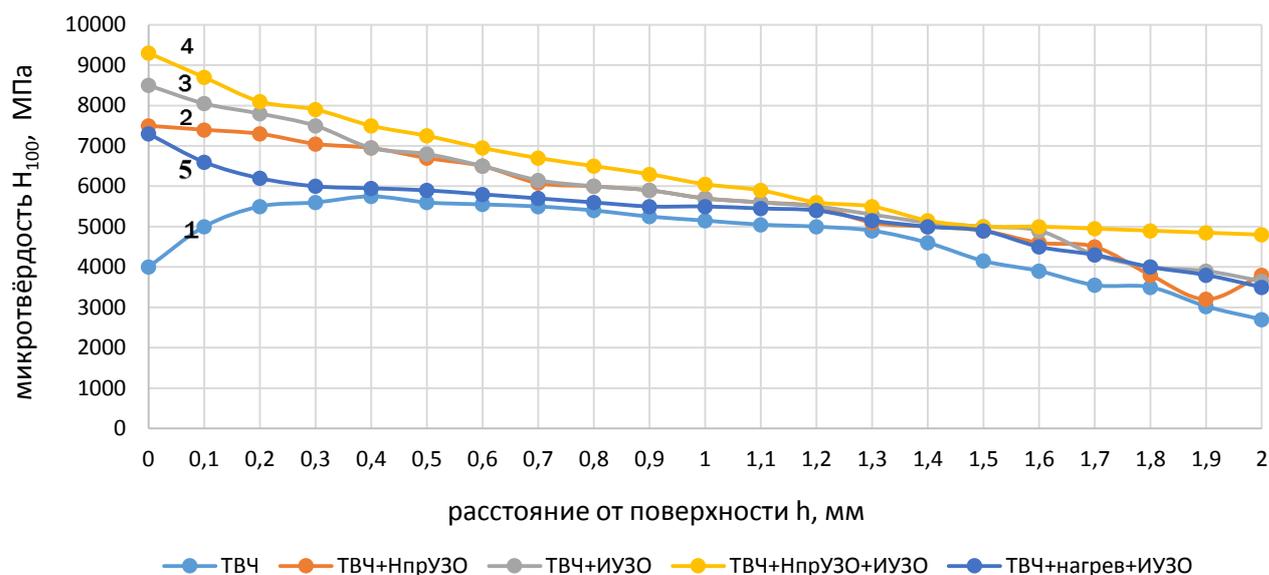


Рис. 5.1. Распределение микротвердости H_{100} после различных видов упрочняющей обработки:
 1 – закалка ТВЧ;
 2 – закалка ТВЧ + НпрУЗО;
 3 – закалка ТВЧ + ИУЗО;
 4 – закалка ТВЧ + НпрУЗО + ИУЗО;
 5 – закалка ТВЧ +нагрев + ИУЗО;

На основании анализа кривых, представленных на рис. 5.1, можно сделать вывод, что НпрУЗО и ИУЗО термообработанных ТВЧ образцов, а также их комбинации приводят к увеличению микротвердости на 40-80% и достигает 9300 МПа.

Увеличение микротвердости при НпрУЗО как и при импульсной ИУЗО объясняется, как нам представляется, эффектом наклепа и деформационным старением.

Наибольшее увеличение микротвердости достигается при комбинации ультразвуковой и импульсной обработке (НпрУЗО+ИУЗО).

Импульсная ультразвуковая обработка (ИУЗО) закаленной стали 45 позволяет значительно снизить шероховатость поверхности. Степень упрочнения на оптимальных режимах достигает 50%. Возможно выпадение микроскопических карбидных включений, увеличение микронапряжений и микродеформаций, плотности дислокаций, уменьшение размеров блоков, прочности и твердости. При импульсной ультразвуковой обработке должны

дополнительно создаваться сжимающие напряжения 1-ого рода, а также создается регулярный микрорельеф, характерный для этого способа обработки, который увеличивает маслостойкость поверхности. Кроме того, увеличивается относительная длина профиля tp , которая, в свою очередь, увеличивает износостойкость. Увеличение твердости, величины сжимающих макронапряжений и создание регулярного микрорельефа с большей относительной опорой длины профиля должно привести к повышению износостойкости [118, 119, 120]. Более высокое качество поверхностного слоя при импульсной ультразвуковой упрочняющей обработке является следствием относительно больших давлений, меньшего времени контакта инструмента с деталью, многократности приложения нагрузки и, следовательно, относительно большей скорости деформации, чем при других способах упрочнения.

При импульсной ультразвуковой обработке (ИУЗО), вероятно, более интенсивно должны протекать процессы деформационного упрочнения, и как следствие этого, большее увеличение микротвердости, микродеформации, плотности дислокации. Величина сжимающих напряжений 1-го рода достигает большого значения чем при НпрУЗО. По-видимому, это объясняется наличием зазора между демпфирующим элементом инструмента и обрабатываемой поверхностью, что приводит к увеличению эффективности передачи энергии. В результате износостойкость деталей, изготовленных из стали 45, должна увеличиваться на большую величину.

Комбинация НпрУЗО и импульсной ультразвуковой обработки (вначале проводится непрерывная ультразвуковая, а затем импульсная (ИУЗО)), по-видимому, должна приводить к мелкоблочной структуре с повышенной плотностью дислокаций и повышенными значениями сжимающих макронапряжений, что, в свою очередь должно привести наряду со снижением шероховатости к повышению величины микротвердости, твердости, предела прочности и износостойкости.

Вариант обратной комбинации (импульсная, а затем ультразвуковая непрерывная обработка), на наш взгляд, менее предпочтителен по той причине, что при обработке по этой схеме после создания на поверхности наклепанного слоя происходит ультразвуковая обработка поверхностного наклепанного слоя, что может привести к разупрочнению металла. По литературным источникам [121-124] отмечается разупрочняющее действие ультразвуковой обработки металлов, подвергнутых деформационному упрочнению. Это, по-видимому, связано с тем, что при импульсной обработке в поверхностном слое металла создается повышенная плотность дислокаций, повышенное значение микронапряжений; при последующей ультразвуковой обработке, способствующей интенсификации движения дислокаций создается крайне неравномерное их распределение в поверхностном слое стали 45, создается повышенная плотность в локальных участках образца и, как следствие этого, рост величины микронапряжений в этих локальных участках и достижение значений, превышающих предел прочности металла. В результате будет проходить разупрочнение.

При ультразвуковой обработке предварительно нагретого металла увеличивается степень пластической деформации, что проявляется в изменении формы зерна, то есть в появлении их вытянутости. Это, видимо происходит за счет увеличения числа генерируемых дислокаций и создания условий для их движения. Кроме того, вероятно создание в поверхностном слое металла мелкоблочной структуры, более равномерное распределение дислокаций за счет термической активации движения дислокаций, что должно привести к повышению износостойкости. Следует также отметить, что увеличение плотности дислокаций согласно литературным данным [121, 125] имеет пороговый характер, так что ультразвуковая обработка предварительно нагретого металла в принципе может привести к увеличению плотности дислокаций, хотя с ростом температуры металла в нем повышается скорость релаксационных процессов, которые приводят к понижению количества дислокаций. В зависимости от скорости зарождения новых дислокаций и их

уничтожения определяются упрочняющий эффект обработки. Естественно конечное упрочнение определяется соотношением скоростей протекания упрочняющих и разупрочняющих процессов, зависящих от температуры и времени контактирования инструмента.

Результаты металлографических исследований образцов из стали 45, после различных ультразвуковых обработок приведены на рис. 5.2.



Рис 5.2. Микроструктура закаленной стали 45 после:
а) ТВЧ; б) НпрУЗО; в) ИУЗО; г) НпрУЗО+ИУЗО
д) нагретого образца + ИУЗО (×400)

Результаты исследования показали, что наибольшее увеличение микротвердости достигается при комбинации НпрУЗО+ИУЗО.

Влияние остаточных напряжений на износостойкость деталей машин исследовалось разными авторами [126, 127], однако, полученные данные противоречивы и не могут дать однозначного ответа на этот вопрос.

В работе исследован характер остаточных напряжений, возникающих в приповерхностном слое в результате ППД НпрУЗО и ИУЗО. Исследования проводились по методике, описанной в главе 2.

Полученные кривые остаточных напряжений (рис. 5.3-5.5), выявленные на установке ДРОН-3, указывают наличие у всех образцов остаточных напряжений сжатия, табл. 5.1. Величина и знак остаточных напряжений зависит от вида обработки. При обработке ТВЧ без УЗО и при комбинировании ТВЧ+НпрУЗО, ТВЧ+ИУЗО образовались остаточные напряжения сжатия.

Таблица 5.1

Влияния комбинированных обработок на остаточные напряжения термообработанных ТВЧ образцов

Вид обработки	Остаточное напряжение σ^1, МПа
ТВЧ	550
ТВЧ+НпрУЗО	900
ТВЧ+ИУЗО	1100
ТВЧ+НпрУЗО+ИУЗО	1200

При упрочняющей ультразвуковой обработке воздействие на очаг деформации является основным параметром, влияющим на величину остаточных напряжений. Как при комбинации НпрУЗО+ИУЗО, так и при ИУЗО получена максимальная величина остаточных напряжений.

Для оценки микроструктуры после упрочняющей обработки исследуемыми способами, определялось физическое уширение линии (211) на термообработанной стали 45.

Методом аппроксимации проводилось разделение на эффекты, связанные с дисперсностью областей когерентного рассеяния Δ и величиной микроискажений второго рода $\frac{\Delta_a}{a}$.

Для определения плотности дислокаций использовали формулу полученную Ивановым А.Н. [128].

$$\rho_d = 3,46 \times 10^{15} \times \beta^2 \text{см}^{-2}, \quad (5.1)$$

где β – уширение линий, вызванное микронапряжениями.

Результаты представлены в таблице 5.2

Таблица 5.2

Вид обработки	$\beta(211)$, рад.	Плотность дислокаций ρ , см ⁻²	H_μ (МПа)
ТВЧ	0,032	$2,2 \cdot 10^{10}$	4000
ТВЧ+УЗО	0,037	$7,66 \cdot 10^{10}$	7500
ТВЧ+ИУЗО	0,067	$4,72 \cdot 10^{11}$	8500
ТВЧ+УЗО+ИУЗО	0,085	$7,8 \cdot 10^{11}$	9300
ТВЧ + нагрев +УЗО	0,038	$7,54 \cdot 10^{10}$	7300

Для определения характера остаточных напряжений после НпрУЗО и ИУЗО и их распределения по глубине поверхностного слоя производились исследования по методике Н.Н. Давиденкова [71].

Измерение остаточных напряжений проводилось на кольцах из закаленной стали 45 диаметром 50 мм, шириной 10 мм и толщиной стенок 5 мм. Кольца обрабатывались по наружному диаметру в результате чего, было образовано остаточное напряжение. После разрезания такого кольца по образующей в зависимости от знака остаточных напряжений ширина резца увеличивалась или уменьшалась. Растягивающие напряжения увеличивали, а сжимающие уменьшали ширину разреза. Разрезанные образцы подвергались травлению одновременно измерению снятого слоя по диаметру.

На основании этих данных определялась величина тангенциальных остаточных напряжений по следующей формуле:

$$\sigma = \pm \left[\frac{2E\delta_p}{(1-\mu^2)D_{cp}^2} \times \left(\frac{h}{2} - a \right) - \frac{E(h-a)^2}{3(1-\mu^2)D_a^2} \times \frac{d\delta}{da} \right] \quad (5.2)$$

где E – модуль упругости исследуемого материала;

a – толщина снятого слоя к моменту измерения;

h – толщина стенки кольца;

da – толщина снятого слоя;

μ – коэффициент Пуассона;

δ_p – деформация кольца разрезки;

D_{cp} – средний диаметр кольца;

D_a – диаметр кольца после снятия слоя;

$dб$ – деформация кольца после снятия слоя.

Результаты исследования остаточных напряжений после различных схем обработок представлены на рис. 5.3 – 5.5.

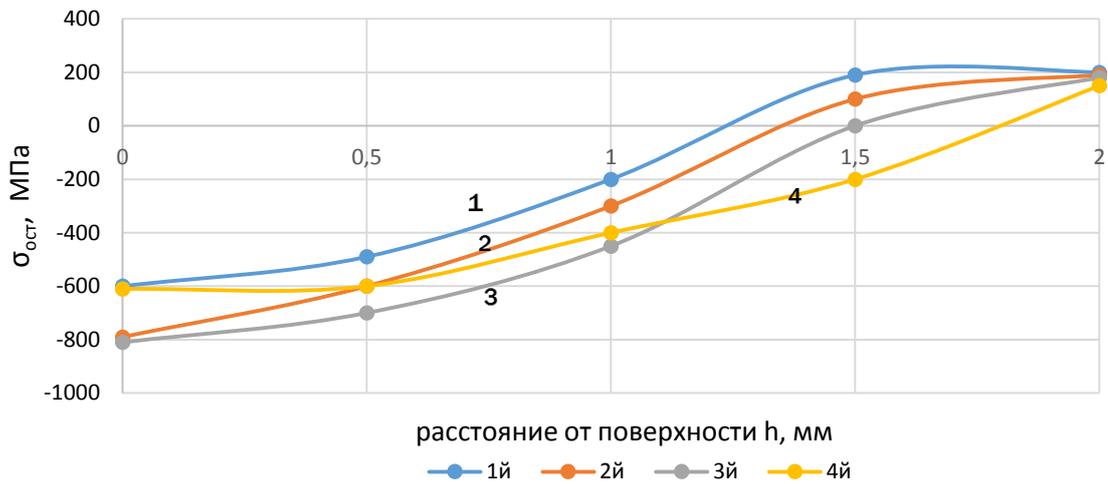


Рис. 5.3. 1 – закалка ТВЧ; 2 - закалка ТВЧ + НпруЗО (1 проход); 3 - закалка ТВЧ + НпруЗО (3 прохода); 4 - закалка ТВЧ+ НпруЗО (5 проходов)

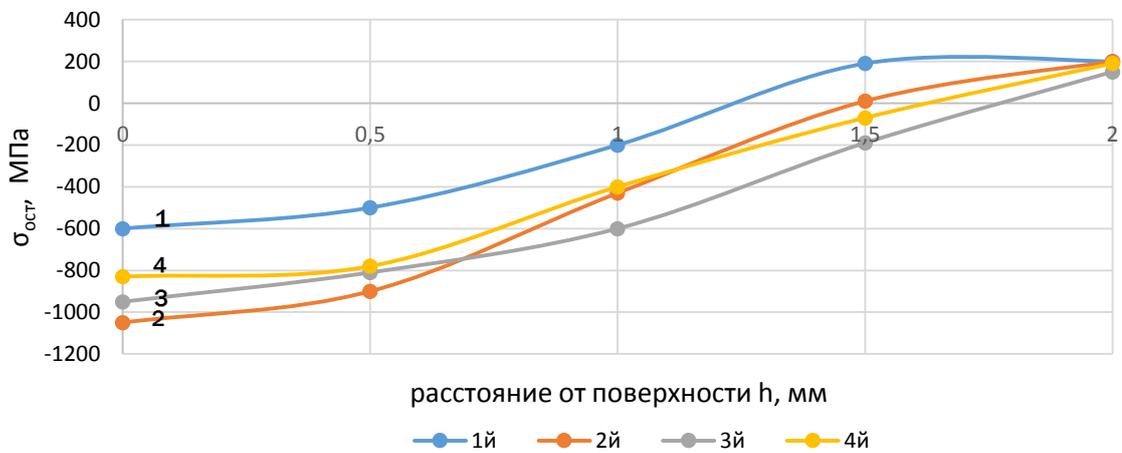


Рис. 5.4. 1 – закалка ТВЧ; 2 - закалка ТВЧ + ИуЗО (1 проход); 3 - закалка ТВЧ + ИуЗО (3 прохода); 4 - закалка ТВЧ+ ИуЗО (5 проходов)

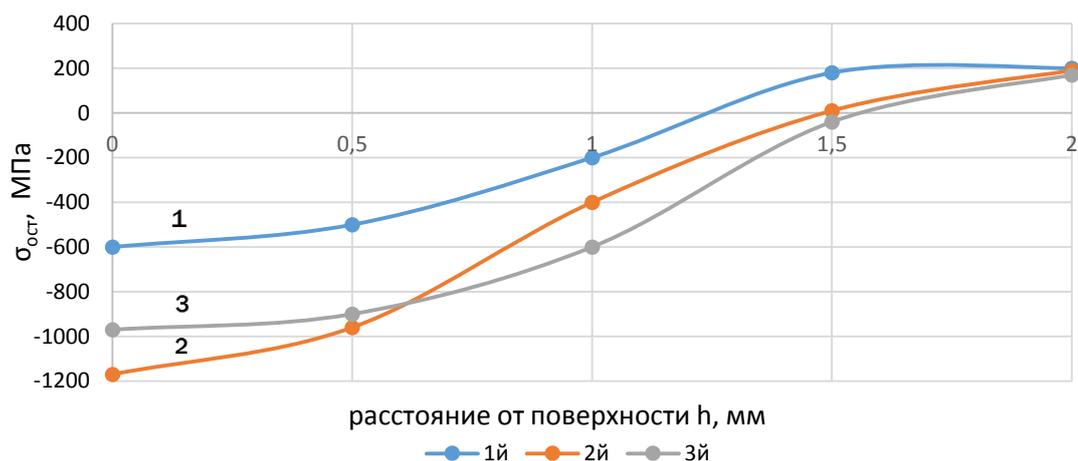


Рис. 5.5. 1 – закалка ТВЧ; 2 - закалка ТВЧ + НпрУЗО+ ИУЗО; 3 - закалка ТВЧ + ИУЗО + НпрУЗО

Исследование износостойкости поверхностей, подвергнутых различным технологическим методам, включающим непрерывный и импульсный способы ультразвуковой обработки, показали значительное влияние ультразвуковых колебаний на износостойкость поверхности. Результаты подтвердили корреляцию между износостойкостью обработанных поверхностей и микротвердостью их поверхностных слоев.

Сравнительные испытания на износостойкость были проведены на образцах с использованием универсальной машины трения УМТ-2168 "Унитриб", в соответствии с методикой, изложенной в главе 2. В этих испытаниях изучалась эффективность различных методов упрочнения. Испытания проводились на образцах из стали 45.

Кривые на графике износа образцов отличаются значительным рассеиванием результатов измерений, что объясняется неравномерным износом поверхности в различных точках.

Графики износа по размеру представлены на рис. 5.6.

Результаты экспериментов по износостойкости обрабатывались методом наименьших квадратов. Для описания экспериментальных зависимостей использовалась математическая модель вида степенной функции 4 порядка. Расчет математических моделей проводился на ЭВМ и с проверкой экспериментальных данных на адекватность по критерию Фишера.

Минимальный износ показали образцы, обработанные импульсной ультразвуковой обработкой. Интенсивность износа этих образцов оказалась наименьшей, см. таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Интенсивность износа образцов из стали 45

№	Метод обработки	Интенсивность износа
1	ТВЧ	0,14
2	ТВЧ+НпрУЗО	0,074
3	ТВЧ+ИУЗО	0,0294
4	ТВЧ+НпрУЗО+ИУЗО	0,059
5	ТВЧ+ нагрев +ИУЗО	0,059

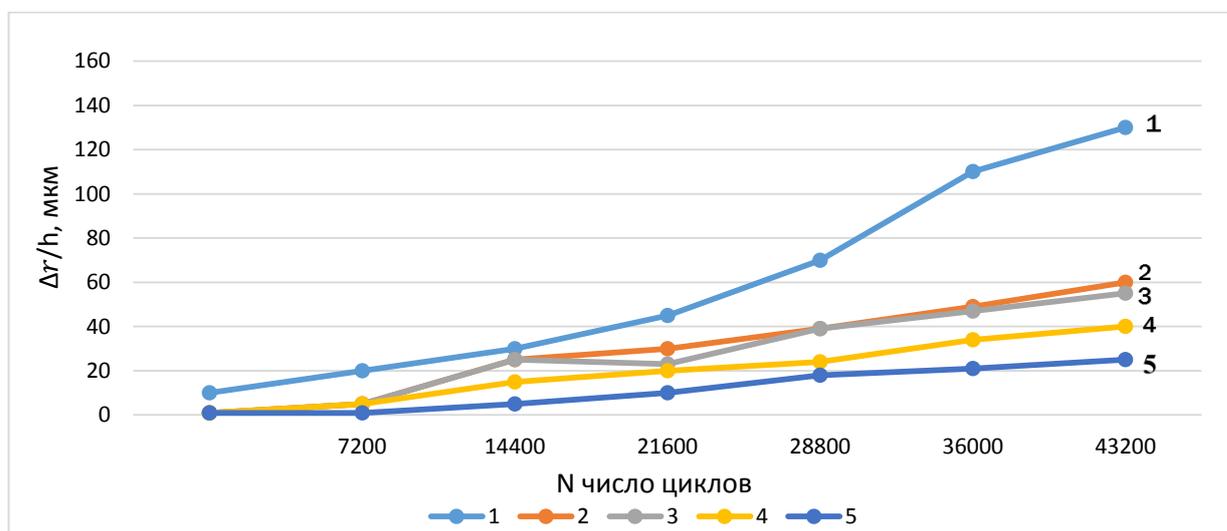


Рис. 5.6. Кривые износа обработанных образцов из стали 45 в зависимости от метода упрочнения и длительности испытания. 1 – ТВЧ; 2 – ТВЧ+ НпрУЗО; 3 – ТВЧ+ НпрУЗО + ИУЗО; 4 – ТВЧ+ нагрев + ИУЗО; 5 – ТВЧ+ИУЗО

Анализируя кривые рис. 5.6 можно видеть, что при одинаковых условиях истирания образцы, обработанные ИУЗО имеют значительно меньший износ по сравнению с образцами обработанными ТВЧ + шлифование. Образцы из стали 45, обработанные ИУЗО имеют износостойкость в 3 раз больше, чем образцы после ТВЧ и шлифования. Обработка предварительно нагретого образца после закалки ТВЧ и последующей НпрУЗО приводит к увеличению износостойкости в 2 раза по сравнению с образцами обработанными ТВЧ и шлифование.

Комбинация НпрУЗО и ИУЗО закаленного образца дает увеличение износостойкости в 3,2 раза по сравнению с ТВЧ + шлифование, но представляется излишне сложной.

Наименьшим способом упрочнения является НпрУЗО, который повышает износостойкость закаленных образцов в 1,6 раза.

Повышение износостойкости в результате упрочняющих методов может быть объяснено созданием благоприятного микрорельефа на обработанной поверхности, заключающегося в сглаживании исходных микронеровностей с получением однородности микрогребешков по высоте и шагу, приводящему к увеличению относительной опорной длины профиля трущихся поверхностей.

При ультразвуковой обработке методом НпрУЗО структурные изменения являются основным механизмом, который управляет процессом упрочнения. Эмпирические оценки микротвердости показывают меньшие различия между непрерывной и импульсной ультразвуковой обработками по сравнению с различиями в расчетных значениях предела текучести для этих методов обработки. При воздействии ультразвука на стальные поверхности могут быть задействованы и другие механизмы, которые могут способствовать возникновению этих расхождений. В дополнение к механизмам, признанным в расчетных моделях, также может активизироваться механизм дисперсионного упрочнения. Это происходит из-за деформационного старения, когда вторичные карбидные фазы выпадают в осадок из перенасыщенного твердого раствора во время пластической деформации, вызванной приложенными нагрузками.

Обработка ультразвуковым упрочнением усиливает пластическую деформацию, уплотнение и микроструктурные деформации решетки. Кроме того, это уменьшает необходимое усилие прижима при сохранении достигнутого эффекта упрочнения.

На рис. 5.7 приведена профилограмма поверхности, полученная при импульсной ультразвуковой обработке. Получается поверхность с регулярным микрорельефом. Такой микрорельеф в сочетании с повышением

твердости и микротвердости позволяет существенно повысить надежность и долговечность детали.

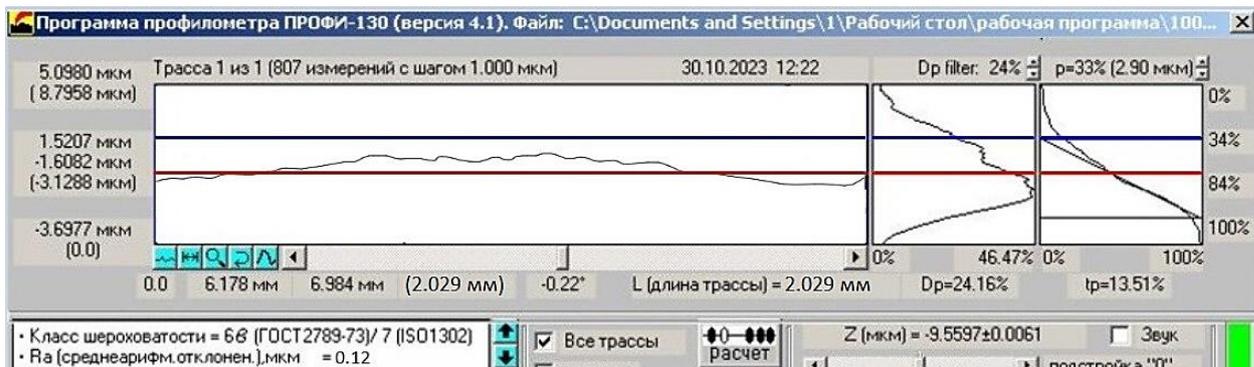


Рис. 5.7. Профилограмма шероховатости поверхности образца из стали 45 после ТВЧ и ИУЗО

Обобщая литературные и экспериментальные данные, можно сделать следующие выводы:

- упрочняющая обработка изделий из конструкционных сталей методом поверхностного пластического деформирования наиболее эффективна при наложении на деформирующий инструмент ультразвуковых колебаний;
- из рассмотренных в работе четырех вариантов (стр. 81): 1) НпрУЗО при непрерывной передаче энергии, 2) ИУЗО, 3) комбинация НпрУЗО с последующей ИУЗО, 4) УЗО предварительно нагретого образца с помощью ТВЧ, - наилучшие результаты получены при комбинации ультразвукового ППД с непрерывной передачей ультразвуковых колебаний и импульсной;
- при исследовании различных видов ППД показано, что происходит повышение комплекса механических свойств и износостойкости стали 45 по сравнению с механической обработкой шлифованием; при НпрУЗО износостойкость увеличивается в 1,6 раза, при импульсной УЗО – в 3 раз, при комбинации НпрУЗО и ИУЗО в 3,2 раза и при ИУЗО нагретого образца в 2 раза, при этом глубина упрочненного слоя, при всех вариантах обработки колеблется от 0,6 до 1,2 мм, что предполагает повышение усталостной прочности на 20%;

- при НпрУЗО и ИУЗО создается повышенная плотность дислокаций. При этом происходит уменьшение блочности структуры, возрастание микронапряжений по сравнению с закалкой ТВЧ;
- ультразвуковое ППД как при непрерывной передаче энергии колебаний, так и импульсной, увеличивает микротвердость поверхностного слоя закаленной стали 45 в 2-2,5 раза и уменьшает шероховатость поверхности с $Ra = 0,63$ мкм до $Ra = 0,12$ мкм.

5.2. Комбинированная обработка удлиненных деталей ППД с ультразвуком

Использование ультразвуковых колебаний при ППД удлиненных деталей, например, штоков гидроцилиндров, цилиндрических направляющих, осей коромысел, осей и штанг толкателей ДВС и др. представляет особую технологическую задачу, которая усложняется необходимостью обеспечения условий для равномерной обработки по длине детали и повышения производительности процесса с одновременным сохранением и даже увеличением качественных показателей (твердости и шероховатости) поверхностного слоя. Такая задача решена путем создания способа комбинированной обработки ППД с ультразвуком [36].

Изобретение относится к области технологии машиностроения и может быть использовано для отделочной финишной обработки деталей комбинированием поверхностного пластического деформирования на универсальных токарных станках, алмазным или твердосплавным индентором и одновременного деформирования аналогичным инструментом с воздействием на него ультразвуковых колебаний.

Известен способ упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием, при котором осуществляют обкатку поверхности детали роликом с усилием, определяемым аналитически исходя из

механических свойств материала детали (см. А.С. СССР №1543768, МПК В24В 39/00, опубл. 2013г.) [129].

Недостатком данного способа является сложность процесса, заключающаяся в большом количестве проходов (10-12) инструмента, и необходимости совершения технологического перехода для достижения требуемого качества поверхности заготовки.

Наиболее близким к заявляемому способу является способ комбинированной обработки деталей, который состоит в том, что комбинированную обработку вращающейся заготовки ведут токарным резцом и размещенным с некоторым отставанием в направлении движения продольной подачи деформирующим элементом шаровидной формы, установленным в акустическом концентраторе, через осевой канал которого в зону обработки подводится СОЖ, при этом деформирующему элементу и СОЖ сообщают амплитудно-модулированные колебания ультразвуковой частоты (см. патент РФ № 2503532, МПК В24В 39/04, опубликовано 2014г.) [130].

Недостатком данного способа является конструктивная сложность комбинированного процесса и ограничение показателей качества обработки, определяемое одним проходом деформирующего инструмента.

Технической задачей, на решение которой направлено изобретение, является повышение качества упрочнения при обработке удлиненных деталей за счет исключения их прогиба от давления инструмента и равномерной обработки по длине заготовки.

Решение поставленной технической задачи достигается тем, что в способе комбинированной обработки детали поверхностно-пластическим деформированием с использованием ультразвуковых колебаний, заключающийся в том, что осуществляют упрочнение поверхности вращающейся детали при поверхностно-пластическом деформировании, одновременно воздействуя на поверхность ультразвуковыми колебаниями, при этом используют два рабочих инструмента, установленные

перпендикулярно поверхности с возможностью их перемещения вдоль детали с продольной подачей $S_{\text{пр}}$, согласно изобретению упомянутые рабочие инструменты установлены по разные стороны от обрабатываемой детали супротивно друг другу в горизонтальной плоскости со смещением их осей, которое назначают кратным значению продольной подачи $S_{\text{пр}}$ с отсчетом от минимального смещения осей, равного значению половине продольной подачи $S_{\text{пр}}$, при этом колебания ультразвуковой частоты сообщают рабочему инструменту, который установлен с опережением по ходу перемещения.

Использование в процессе комбинированной обработки двух соответствующих инструментов, расположенных по разные стороны детали в одной плоскости супротивно друг другу и со смещением, кратным значению продольной подачи $S_{\text{пр}}$ с отсчетом от минимального смещения осей, позволяет повысить качество упрочнения при обработке удлиненных деталей, за счет исключения их прогиба от давления инструмента и равномерной обработки по длине обрабатываемой детали.

Изобретение поясняется чертежами, где на рис. 5.8 представлена общая схема, поясняющая способ комбинированной обработки, а на рис. 5.9 и 5.10 изображен выносной элемент I на рис. 5.8 для различных вариантов смещения оси рабочего инструмента [36].

На чертежах приняты следующие обозначения: $F_{\text{пр1}}$ и $F_{\text{пр2}}$, R_1 и R_2 – соответственно сила прижима и радиусы поверхности рабочих инструментов, воздействующих на обрабатываемую деталь; n , ξ и f – соответственно частота вращения обрабатываемой детали, амплитуда и частота колебаний ультразвуковой системы; Δ – смещение осей рабочего инструмента.

Способ комбинированной обработки деталей заключается в том, что вращающуюся деталь подвергают упрочнению, осуществляя воздействие на ее поверхность при поверхностно-пластическом деформировании.

Одновременно на поверхность обрабатываемой детали воздействуют колебаниями ультразвуковой частоты. При этом в процессе обработки при продольной подаче $S_{пр}$ используют рабочие инструменты, которые установлены перпендикулярно поверхности упомянутой детали, но по разные стороны от обрабатываемой детали супротивно друг другу в горизонтальной плоскости и со смещением их осей. Причем смещение осей назначают кратным значению продольной подачи $S_{пр}$ с отсчетом от линии смещения осей, равному половине продольной подачи $S_{пр}$ рабочих инструментов. При этом колебания ультразвуковой частоты сообщаются рабочему инструменту, который установлен с опережением по ходу перемещения.

На схеме (рис. 5.8) поясняющей способ комбинированной обработки, изображены следующие элементы: патрон 1; обрабатываемая деталь 2; прижимная штанга 3; корпус 4; пружина 5; инструменты 6 и 7; концентратор ультразвуковых колебаний 8; ультразвуковой преобразователь 9; кожух охлаждения 10; задняя бабка 11. При этом рабочий инструмент 7 представляет собой излучатель ультразвуковой системы [36].

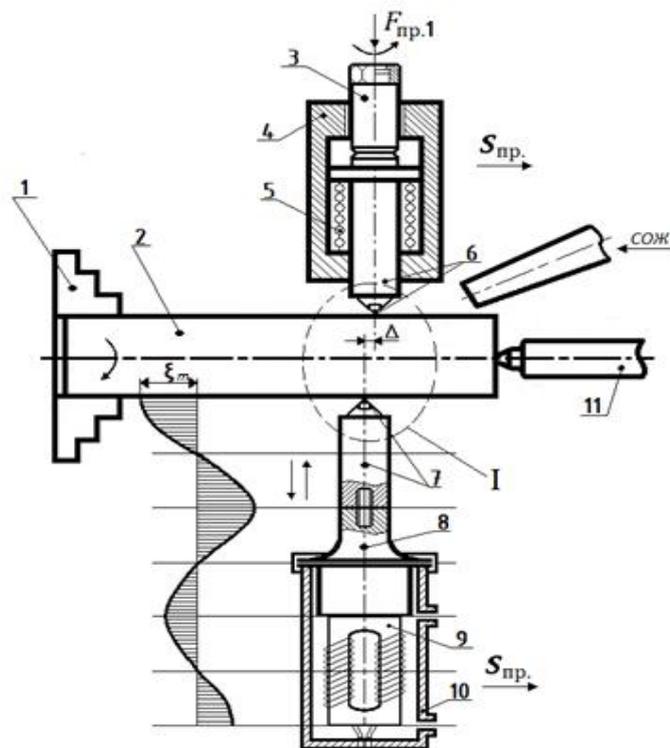


Рис. 5.8. Схема комбинированной обработки

Способ комбинированной обработки осуществляется следующим образом.

При вращении обрабатываемой детали 2 с частотой n оборотов, установленной в патроне 1 и задней бабке 11, на поверхность детали воздействуют рабочие инструменты 6 и 7, которые оснащены твердосплавным наконечником шаровидной формы с радиусами кривизны и R_2 , соответственно. Рабочие инструменты 6 и 7 жестко связаны с суппортом токарно-винторезного станка и прижаты к обрабатываемой поверхности детали 2 с соответствующим усилием прижима $F_{пр1}$ и $F_{пр2}$. Первоначально поверхность деформируется рабочим инструментом 6, а затем обрабатывается рабочим инструментом 7 в виде излучателя, на который накладываются ультразвуковые колебания с амплитудой ξ и частотой f . Упомянутый рабочий инструмент 7 установлен относительно рабочего инструмента 6 с отставанием, для чего между осями обоих инструментов 6 и 7 назначают смещение, которое кратно продольной подачи $S_{пр}$, но с отсчетом от минимального смещения осей, значение

которого равно половине продольной подачи, т.е. $\Delta = 0,5 S_{\text{пр}}$ (рис. 5.9). Рабочий инструмент 7 осуществляет деформирование поверхностного слоя обрабатываемой детали 2, выравнивая неровности поверхности после рабочего инструмента 6. При этом рабочий инструмент 7 в качестве излучателя ультразвуковых колебаний входит в состав акустической системы, включающей также волновод-концентратор 8 и преобразователь 9, и может быть выполнен сменяемым. Вариант двукратного смещения оси рабочего инструмента 7 с отчетом от минимального значения $\Delta = 0,5 S_{\text{пр}}$ указан на рис. 5.10. В процессе обработки в рабочую зону подается охлаждающая жидкость. В итоге описанная комбинированная обработка позволяет последовательно деформировать поверхностный слой обрабатываемой детали сначала одним рабочим инструментом на который накладываются ультразвуковые колебания, а затем другим. Смещение излучателя, на величину равную $\Delta = 0,5 S_{\text{пр}}$ позволяет осуществлять дополнительное демпфирование поверхностного слоя с шагом, кратным продольной подачи $S_{\text{пр}}$, строго по вершинам образовавшегося рельефа неровностей после предварительного демпфирования. При этом расположенные в одной плоскости супротивно друг другу рабочие инструменты исключают возможность прогиба удлиненных деталей и тем самым улучшают качество обработки по всей длине обрабатываемой детали. В результате обеспечивается высокая производительность процесса поскольку обработка осуществляется за один проход, снижается шероховатость поверхности, создаются сжимающие напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали на глубину, превышающую ее величину при деформировании без ультразвука, что улучшает качество обработки.

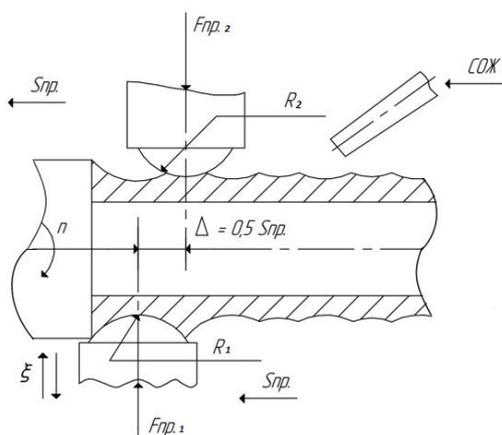


Рис. 5.9. Увеличенный масштаб на выносном элементе I

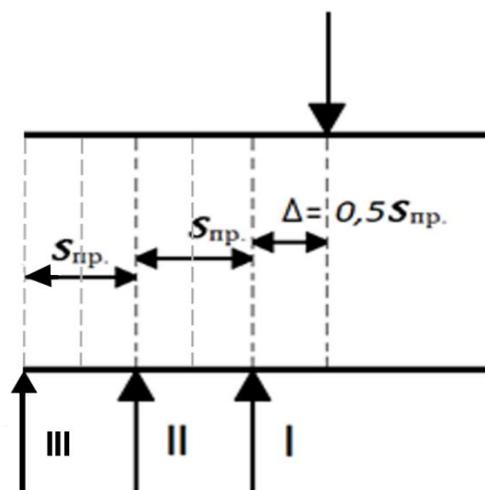


Рис. 5.10. Шаг установки инструментов

Кроме этого, использование двух не совмещённых в одной конструкции рабочих инструментов, позволяет не тратить средства на изготовление специальных инструментов, как в прототипе, а дают возможность использовать уже имеющееся оборудование.

Таким образом, изобретение позволяет повысить качество упрочнения при обработке удлиненных деталей за счет исключения их прогиба от давления инструмента и равномерной обработки по длине обрабатываемой детали.

Использование одновременно двух инструментов позволяет не только устранить возможный прогиб обрабатываемой детали, но и снизить шероховатость поверхности на 15-20% и вдвое сократить количество проходов и тем самым увеличить в 2 раза производительность упрочняющей операции.

5.3. Технологические рекомендации по ультразвуковому ППД нежестких валов

Разработанная технология УЗО направлена на повышение качественных характеристик поверхностного слоя ответственных изделий, на повышение производительности их финишной обработки. Становится возможным ППД конструкционных сталей без существенной

модернизации производственной базы. При обработке деталей за один «установ» исключается внутрицеховая транспортировка деталей, происходит экономия производственных площадей, электроэнергии, отпадают потребности в трудоемкой операции шлифования. При крупносерийном производстве возможна и целесообразна автоматизация процесса УЗО ППД.

При проведении технологической подготовки производства и разработке технологического процесса с использованием УЗО ППД необходимо придерживаться следующей последовательности действий:

1. Проанализировать обрабатываемые материалы и определить их соответствие техническим требованиям конструкторской документации.

2. На основании технических требований конструкторской документации на обрабатываемые детали и учитывая условия их работы необходимо выбрать поверхности, которые будут подвергаться УЗО ППД и сформировать требования к ним после обработки (наличие поверхностных дефектов, требуемая величина шероховатости, твердости и т.д.)

3. Разработать рациональную схему обработки (смоделировать процесс перемещения деформирующего элемента по поверхности), определить на каком оборудовании должна вестись обработка, а также необходимость разработки и применения специальной оснастки.

4. Указать контролируемые параметры, такие как частота колебаний, амплитуда колебаний, скорость подачи и определить какие методы и средства должны применяться для их контроля.

Режим упрочнения представлен таблицей 5.4, исходя из условий реализации импульсного способа передачи ультразвуковых колебаний от инструмента-индентора обрабатываемой детали.

Предложенный способ обработки обеспечивает повышение производительности поскольку обработка осуществляется одновременно двумя инструментами за один проход.

Основные рекомендации по УЗО ППД нежестких валов

1. *Назначение:* ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование нежестких валов из стали 45 ($l/d \geq 12$).
2. *Оборудование:* модернизированный токарно-винторезный станок 1К625 с дополнительным оборудованием, устанавливаемом на суппорте.
3. *Источник ультразвука:* ультразвуковой генератор УЗГ 5-1,6, выходная мощность 1,6 кВт.
4. *Инструмент:* оригинальная 3-х полуволновая УЗКС.

Таблица 5.4

Материал	Материал инструмента	Режим упрочнения							Технологические характеристики			
		Сила прижима F_N , Н	Число оборотов n об/мин	Амплитуда ξ_m , мкм	Зазор инструмент – деталь δ , мм	Продольная подача $S_{пр}$, мм/об	Число проходов i	Частота f , кГц	До упрочнения		После упрочнения	
									R_a , мкм	H_μ , МПа	R_a , мкм	H_μ , МПа
Сталь 45	ВК8 ($r = 5$ мм)	75	50..100	13	0	0,08...0,1	1	22	0,63	4000	0,12	8500

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного исследования решена научно-практическая задача повышения производительности и качества обработки нежестких валов из малолегированных и углеродистых сталей путем замены шлифования на совмещенный и комбинированный способы обработки ППД с наложением ультразвуковых колебаний.

2. При исследовании различных видов комбинирования ППД определено, что происходит повышение комплекса механических свойств стали 45. При ультразвуковой обработке износостойкость увеличивается в 1,6 раза, при ТВЧ нагретого образца более чем в 2 раза, при ТВЧ+НпрУЗО при непрерывной передаче колебаний – в 3 раз, при комбинации ультразвуковой и импульсной в 3,2 раза, при этом глубина упрочненного слоя при всех вариантах обработки колеблется от 0,6 до 1,2 мм.

3. Комбинация поверхностного пластического деформирования (ППД) с ультразвуковой (УЗО) и химико-термической обработкой (ХТО) поверхности стальных изделий позволяет получить повышение твердость на 60% до $HV = 475$, уменьшает резкий перепад значений микротвердости на границе азотированного слоя и обеспечивает увеличение глубины упрочнения в 2 раза.

4. Комбинация методов ультразвукового ППД термообработанных ТВЧ образцов приводит к увеличению микротвердости на $40 \div 80\%$ и достигает 9300 МПа. Такой технологический результат, по-видимому, связан с созданием в поверхностном слое металла мелкоблочной структуры с более равномерным распределением дислокаций за счет термической активации движения дислокаций, что приводит к повышению износостойкости.

5. Разработана схема комбинированной обработки, включающая импульсное и последующее ППД, отличающаяся от других способов УЗО ППД высокой эффективностью передачи энергии ультразвуковых колебаний в очаг деформации и в 2 раза большей скоростью деформации, наилучшими достижимыми параметрами качества поверхностного слоя (шероховатость - до $Ra = 0,12$ мкм, микротвердость – до $H_{\mu} 8500$ МПа).

6. На основе проведенного теоретического анализа ультразвуковых высокоамплитудных УЗКС, для повышения амплитуды смещения рабочего торца инструмента-индентора и снижения акустических потерь в сочленениях многополуволновой УЗКС, разработана конструкция УЗКС, применяемая для комбинированной обработки ППД с ультразвуком.

7. С целью повышения эффективности ультразвукового ППД длинномерных деталей за счет повышения производительности и их равномерной обработки разработан способ комбинированной обработки ППД с ультразвуком (патент №2794512 от 19 апреля 2023), заключающийся в использовании одновременно двух инструментов – инденторов, установленных со смещением кратным $0,5S_{\text{ПР}}$, одному из которых сообщаются ультразвуковые колебания.

8. На основе проведенных исследований разработаны комбинированные технологические процессы ППД с применением ультразвука. Технологии переданы для опытно-промышленного внедрения на ООО "МЕРКАТОР ХОЛДИНГ"; ожидаемый экономический эффект складывается из применения недорогих сталей, сокращения количества операций и повышения производительности технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин, В. Е. Новые материалы и технологии. Конструирование новых материалов и упрочняющих технологий / В. Е. Панин, В. А. Клименов, С. Г. Псахье. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, – 1993. – 152 с.
2. Смелянский, В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – Москва: Машиностроение, 2002. – 300 с.
3. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л. Г. Одинцов. – Москва: Машиностроение, – 1987. – 328 с.
4. Кобрин, М. М. Эпюры остаточных напряжений при контактной и контактно-сдвиговой схемах поверхностного пластического деформирования / М. М. Кобрин // Вестник машиностроения, – 1963. – №1. – С.56–60.
5. Кувшинов, М. О. Сравнительный анализ методов поверхностного пластического деформирования (ППД) / М. О. Кувшинов, А. А. Хлыбов // Уральская школа молодых металловедов / Сб. тр. Международной науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во Уральский федеральный университет, 2017. – С. 37–42.
6. Муханов, И. И. Формирование поверхностного слоя деталей ультразвуковым инструментом (при упрочняюще-чистовом и размерном способах обработки): автореф. на соиск. учн. степ. дис. докт. техн. наук: 05.02.08 / Муханов Иван Иванович; – Минск, 1973. – 40 с.
7. Чудинов, А. В. Упрочняюще-чистовая обработка стальных закаленных деталей ультразвуковым инструментом: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 164 / Чудинов Александр Васильевич; – Новосибирск, 1972. – 132 с.
8. Тяпунина, Н. А. Особенности пластической деформации под действием ультразвука / Н. А. Тяпунина, В. В. Благовещенский, Г. М. Зиненкова // Изв. ВУЗов. Физика. – 1982. – № 6. – С. 118–128.

9. Маталин, А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин // Машгиз, – 1956. – 252 с.

10. Рыковский, В. П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом / В. П. Рыковский, В. А. Смирнов, Г. М. Щетинин // – М.: Машиностроение, – 1985. – 152 с.

11. Карпенко, Г. В. Влияние механической обработки на прочность и выносливость стали / Г. В. Карпенко // Государственное научно-техническое машиностроительной литературы Москва Киев, – 1959. – 188 с.

12. Пазков, А. Ф. Влияние алмазного выглаживания на точностные характеристики деталей / А. Ф. Пазков // Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. – Москва: МДНТП им. Дзержинского. – 1980. – С. 101–104.

13. Цибрик, А. Н. Основы структурно-геометрического упрочнения деталей / А. Н. Цибрик, М. И. Аверченков В. А. Цибрик // – Киев: Наук. Думка, 1979. – 178 с.

14. Панов, А. П. Электрофизические методы обработки материалов / А. П. Панов, Т. Н. Иванова. – Москва: Автомобильно-дорожная инфраструктура, 1976. – 34 с.

15. Северденко, В. П. Ультразвуковая обработка металлов / В. П. Северденко, К. В. Горев, Е. Г. Коновалов. – Минск: Наука и техника, – 1996. – 246 с.

16. Озерова, М. А. Исследование эффективности воздействия ультразвуковых колебаний на процесс алмазного выглаживания авиационных материалов: автореф. на соиск. учн. степ. дис. канд. техн. наук: 05.171 / Озерова Маргарита Александровна; – Москва, 1973. – 17 с.

17. Куюн, А. И. Метод комплексного исследования тепловых явлений в поверхностных слоях металла при трении и износе, резании и шлифовании: автореферат дис. работы, представл. на соискание учен. степени кандидата техн. наук / Куюн А.И.; Ин-т строит. механики. – Киев, 1954. – 12 с.

18. Ланда, В. А. Исследование структурных превращений, возникающих при шлифовании сталей: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Ланда, Вадим Александрович; – Москва, 1961. – 212 с.

19. Подосенова Н. А. Исследование качества поверхностного слоя круглом наружном шлифовании закаленной стали: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Подосенова Наталья Алексеевна; – Москва, 1956, – 216 с.

20. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Маталин, Андрей Александрович; – Москва, Ленинград: Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1956. – 252 с.

21. Панин, В. Е. Физические принципы мезомеханики поверхностных слоев и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле / В. Е. Панин, В. М. Фомин, В. М. Титов // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6. – № 2. – С. 5–14.

22. Приходько, В. М. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий / В. М. Приходько Л. Г. Петрова О. В. Чудина. – Москва: Машиностроение, – 2003. – 384 с.

23. Иванова, В. С. Исследование циклической вязкости разрушения стали 45 и выбор оптимальной поверхностной упрочняющей обработки / В. С. Иванова, В. А. Кобзев, В. Ф. Терентьев // Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. – 1981. – С. 107–126.

24. Приходько, В. М. Применение гибридных ультразвуковых технологий для получения функциональных покрытий / В. М. Приходько, Д. С. Симонов, А.В. Сухов [и др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – № 3(129). – С. 27–31.

25. Северденко, В.П. Применение ультразвука в промышленности / В. П. Северденко, В. В. Клубович // – Минск: Наука и техника, 1967. – 264 с.

26. Кувшинов, М. О. Влияние поверхностного пластического деформирования в ультразвуковом поле на структуру и свойства стали 12X18H10T / М. О. Кувшинов, А. А. Хлыбов // Деформация и разрушение

материалов и наноматериалов / Сб. тр. Международной конф. – Москва: Изд-во ИМЕТ РАН, 2017. – С. 455–457.

27. Кувшинов, М. О. Сравнительный анализ методов поверхностного пластического деформирования (ППД) / М. О. Кувшинов, А. А. Хлыбов // Уральская школа молодых металлосведов / Сб. тр. Международной науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во Уральский федеральный университет, 2017. – С. 37–42.

28. Кувшинов, М. О. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование – эффективный метод повышения эксплуатационных характеристик деталей машин / М. О. Кувшинов, А. А. Хлыбов, Д. Ю. Магин // Уральская школа молодых металлосведов / Сб. тр. Международной науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во Уральский федеральный университет, 2016. – С. 34–38.

29. Браславский, В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В. М. Браславский, – Москва: Машиностроение, – 1975. – 160 с.

30. Абрамов, В. О. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / О. В. Абрамова, В. М. Приходько [и др]. – Москва: Янус-К, 2006. – 687 с.

31. Приходько, В. М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте транспортной техники / В. М. Приходько. – Москва: Изд-во ООО «Техполиграфцентр», – 2003. – 252 с.

32. Приходько, В. М. Физические основы ультразвуковой технологии при ремонте автотракторной техники / В. М. Приходько. – Москва: Брандэс, 1996. – 127 с.

33. Тяпунина, Н. А. Особенности пластической деформации под действием ультразвука / Н. А. Тяпунина, В. В. Благовещенский, Г. М. Зиненкова // Изв. ВУЗов. Физика. – 1982. – № 6. – С. 118–128.

34. Муханов, И. И. Ультразвуковое упрочнение стальных деталей машин / И. И. Муханов, Ю. Н. Голубев, В. Н. Филимоненко. – Новосибирск: НТО

машпром. В.кн.: сб. докл. новосибирской науч.-техн.конф. по машиностроению, 1964. – С. 37–39.

35. Муханов, И. И. Упрочнение стальных деталей шариком, вибрирующим с ультразвуковой частотой / И. И. Муханов, Ю. М. Голубев // – Вестник машиностроения, 1966. – №11. – С. 52–53.

36. Способ комбинированной обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием с использованием ультразвуковых колебаний: патент №2794512 С1 Российская Федерация: МПК В24В 39/04 / авторы и заявители Приходько В. М., Симонов Д. С.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)", опубл. 19.04.2023.

37. Муханов, И. И. Поверхностный слой стальных деталей машин после ультразвуковой чистовой и упрочняющей обработки / И. И. Муханов К. М. Голубев // Металловедение и термическая обработка металлов, – 1969. – №9. – С. 141–147.

38. Асанов, В. Б. Качество поверхностного слоя деталей машин и его особенности после упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом: дис. на соиск. учен. степ. канд.тех.наук: 05.02.08 / Асанов Вениамин Бадьминович; – Новосибирск, 1972. – 156 с.

39. Муханов, И. И. Ультразвуковая упрочняюще-чистовая обработка стали и чугуна / И. И. Муханов // - Вестник машиностроения, – 1968. №6. С. 51–54.

40. Муханов, И. И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом / И.И. Муханов. – Москва: Машиностроение, – 1978. – 44 с.

41. Северденко, В. П. Ультразвук и пластичность / В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, – 1976. – 446 с.

42. Казанцев, В. Ф. Физические основы воздействия ультразвука на процесс обработки твердых тел: дис. на соиск. учен. степ. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.06. / Казанцев Всеволод Феодосьевич. – Москва, 1980. – 403 с.
43. Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов / А. И. Марков. – Москва: Машиностроение, – 1980. – 237 с.
44. Казанцев, В. Ф. Физические основы воздействия ультразвуковых колебаний на процесс пластического деформирования / В. Ф. Казанцев // Москва: Metallurgy, – 1981, – С. 91–96.
45. Фридель Ж. Дислокация / Ж. Фридель // – Москва: Мир. – 1967. – 643с.
46. Кулемин, А. В. Физические процессы в металлах и сплавах в твердом состоянии при знакопеременном нагружении с ультразвуковой частотой: дис. на соиск. учен. степ. док. тех. наук: 01.04.07/ Кулемин Анатолий Викторович; – Москва, – 1980. – 498 с.
47. Петрова, Л. Г. Материаловедение / Л. Г. Петрова. – Москва: МАДИ (ГТУ), 2008. – 288 с.
48. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. Учебник для вузов. – М.: ООО «ТИД «Аз-Book», – 2009. – 448 с.
49. Лахтин, Ю. М. Основы металловедения / М. Ю. Лахтин. – Москва: ИНФРА, 2013. – С. 154–186.
50. Александров, В. А. Влияние ультразвуковой кавитации на состояние поверхностного слоя азотируемой стали / В. А. Александров, Д. С. Фатюхин, Л. Г. Петрова // Металловедение и термическая обработка металлов, 2015. – №5 (719). – С. 55–58.
51. Алехин, В. П. Нанотехнология поверхностной упрочняющей и финишной обработки деталей из конструкционных и инструментальных сталей / В. П. Алехин, О. В. Алехин // Машиностроение и инженерное образование. – 2007. – № 4. – С. 2–13.

52. Фатюхин, Д. С. Ультразвуковые технологии на современном этапе развития машиностроения / Д. С. Фатюхин, В. М. Приходько // Научные технологии в машиностроении, 2016. – №8 (62). – С. 37–42.
53. Шеина, А. Е. Удаление продуктов коррозии с чугуна рабочего колеса закрытого типа с помощью ультразвукового травления / А. Е. Шеина, В. М. Приходько // Научные технологии на современном этапе развития машиностроения: материалы VIII Международной научно-технической конференции 19-21 мая 2016. – Москва: МАДИ. – 2016. – С. 184–186.
54. Минкевич, А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. – Москва: Металлургия, 1965. – 491 с.
55. Биронт, В. С. Применение ультразвука при термической обработке металлов / В. С. Биронт. – Москва: Металлургия, 1977. – 168 с.
56. Архангельский, М. Е. Ультразвуковая техника / М. Е. Архангельский. – 1967. – Выпуск 3. – С. 43–47.
57. Борисов, Ю. Я. Акустический журнал / Ю. Я. Борисов, Ю. Г. Статников. – 1966. – №12 (3). – С. 372–373.
58. Панов, А. П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей / А. П. Панов. – М.: Машиностроение, – 1984. – 88 с.
59. Nevill G. F., Brotzrn F. R. The effect of vibrations on the static yield strength of low – carbon steel – Proc. Amer. Soc. for Test. Mat., 1957. 57. P. 751 – 758.
60. Friedrich R., Engel U. Influence of mechanical vibrations on tensile and creep tests – In: Proc. I Intern. Symp. High-power Ultrasonic IPC Science and Technology press ltd. Guild – ford, 1972. P. 72–77.
61. Herbertz J. The influence of mechanical vibrations on plastic deformation of metals. – In: Ultrasonic int. Conf. Brighton. Engl., 1977. P. 323–328.
62. Казанцев, В. Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок. – Москва: Машиностроение, 1980. – 44 с.
63. Гершгал, Д. А. Ультразвуковая аппаратура / Д. А. Гершгал, В. М. Фридман. – Москва: Госэнергоиздат, 1968. – 262 с.

64. Гершгал, Д. А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д. А. Гершгал, В. М. Фридман. – Москва: Энергия, 1976. – 320 с.

65. Аленичев, В. Н. Цилиндрический излучающий элемент, оптимизированный для передачи максимальной мощности в рабочую среду / В. Н. Аленичев, Л. О. Макаров, А. А. Рухман // Ультразвуковые технологические процессы – 98: Сб. докл. науч.-техн. конф., Москва, 2-6 февраля, 1998 / МАДИ (ТУ). – Москва. – 1998. – С. 221–224.

66. Китайгородский, И. Ю. Исследование и разработка высокоамплитудных малогабаритных составных ультразвуковых преобразователей технологического назначения: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 01.04.06./ Китайгородский Игорь Юрьевич: – Москва, 1982. – 178 с.

67. Абрамов, О. В. Влияние ультразвуковых колебаний на контактное трение между металлами. В. кн.: Применение новых физических методов для интенсификации металлургических процессов / О. В. Абрамов, А. В. Кулемин // - М.: Металлургия, – 1947. – С. 214–2016.

68. Агранат, Б. А. Основы физики и техники ультразвука. Учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский [и др.] – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

69. Казанцев, В. Ф. Физические основы технологического применения ультразвука / В. Ф. Казанцев. – Москва: Изд-во МАДИ (ГТУ). – 2008. – 102 с.

70. Китайгородский, Ю. И. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем / Ю. И. Китайгородский, Д. Ф. Яхимович. – Москва: Наука, 1967. – С. 149–206.

71. Давиденков, Н. Н. Измерение остаточных напряжений в трубах Ж.Т.Ф. т. 1, вып. 1. 1931.

72. Лялькина, Г. Б. Математическая обработка результатов эксперимента: учебное пособие / Г. Б. Лялькина, О. В. Бердышев. - Пермь: ПНИПУ, 2013. – 77 с.

73. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666260 Российская Федерация. Расчет поверхностно-пластического деформирования с ультразвуком по заданным параметрам: № 2022665524: заявл. 16.08.2022: опубл. 29.08.2022 / Д. С. Симонов, В. С. Ершов, А. А. Акулов, Д. С. Талдыкин.

74. Меркулов, Л. Г. Расчет ультразвуковых концентраторов / Л. Г. Меркулов // Акустический журнал. – 1957. – т. Ш. – вып. 3. – С. 230–238.

75. Хмелев, В. Н. Совершенствование конструкции резонансного концентрирующего звена с увеличенной поверхностью излучения. / В. Н. Хмелев, С. С. Хмелев, Р. В. Барсуков и др. // Техническая акустика. – Электрон. журн. – 2012. – 7. Режим доступа: <http://www.jeta.org>.

76. Теумин, И. И. Ультразвуковые колебательные системы. М.: Машгиз. – 1959. – 331 с.

77. Брагинский, В. Б. Системы с малой диссипацией / В. Б. Брагинский, В. П. Митрофанов, В. И. Панов. М.: Наука. – 1981. – 144 с.

78. Копова, А. М. Слабые связи в резонансных ультразвуковых колебательных системах / А. М. Копова, Л. О. Макаров, М. А. Полковникова // Ультразвук в технологии машиностроения. – Архангельск, 1991. – С. 268–271.

79. Webster, A. G. Acoustical Impedance and the Theory of Horns and the Phonograph. / A. G. Webster // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1919. – № 5. – p. 275–282.

80. Energy storage in high frequency vibratory devices: pat. 3341935 USA. / L. Balamuth; Cavitron Ultrasonic Inc, publ. 19.09.1967.

81. Ультразвуковая колебательная система с промежуточным резонатором: патент №2106205 Российская Федерация: МПК В 06 В 3/00, Н 04 R 15/02, Н 04 R 17/00 / авторы и заявители Аленичев В. Н., Макаров Л. О., Рухман А. А.; патентообладатель Закрытое акционерное общество Межотраслевая производственная компания "Афалина", опубл. 10.03.1998.

82. Каханцев, В. Ф. Источники ультразвука / В. Ф. Каханцев. – М.: Техполиграфцентр. – 2010. – 252 с.
83. Силин, Л. Л. Ультразвуковая сварка / Л. Л. Силин, Г. Ф. Баландин, М. Г. Коган. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы. – 1962. – 252 с.
84. Клочков, Д. П. Повышение эффективности обработки поверхностей деталей применением ультразвукового поля / Д. П. Клочков, О. В. Бурлаченко // Известия Волгоградского ГТУ: Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2009. – Т. 8. – №5. – С. 8–9.
85. Соловьев, Д. Л. Деформационное упрочнение способом статико-импульсного нагружения / Д. Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 10. – С. 3–6.
86. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва: Гостехиздат, – 1956. – 600 с.
87. Шмидт, Г. Параметрические колебания / Г. Шмидт. – Москва: Мир. – 1978. – 336 с.
88. Китайгородский, Ю. И. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем / Ю. И. Китайгородский, Д. Ф. Яхимович. – Москва: Машиностроение. – 192. – 56 с.
89. Панин, В. Е. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле / В. Е. Панин, А. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7–15.
90. Приходько, В. М. Регуляризация микрорельефов поверхностей деталей машин с помощью ультразвуковых колебаний / В. М. Приходько, А. И. Каттос, Л. И. Карпов. – Москва: Деп. в ЦНИИТЭИавтопром, 1987. – № 1544-АП 87.
91. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики Surface roughness. Parameters and characteristics: межгосударственный стандарт МКС 01.040.25. Дата введения 1975-01-01.

Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, – 2018. – 8 с.

92. Приходько, В. М. Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей с применением ультразвукового воздействия / В. М. Приходько, О. В. Чудина // Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 2003. – №1. – С. 11–20.

93. Марков, А. И. Применение ультразвука при алмазном выглаживании деталей / А. И. Марков, Н. Д. Устинов, М. А. Озерова. – Вестник машиностроения, – 1973. – №9. – С. 57–61.

94. Приходько, В. М. Комбинирование методов химико-термической обработки с ультразвуком / В. М. Приходько, Д. С. Симонов, Т. Д. Дмитриев, Л. Я. Кеблavi // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – № 1(56). – С. 49–54.

95. Балтер, М. А. Упрочнение деталей машин / М. А. Балтер. – Москва: Машиностроение, – 1978. – 184 с.

96. Маталин, А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – Киев: Техника, – 1971. – 144 с.

97. Марков, А. И. Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей режущего инструмента / А. И. Марков, И. Д. Устинов. – Москва: Машиностроение, – 1979. – 54 с.

98. Панин, А. В. Зарождение и развитие потоков дефектов на поверхности деформируемого твердого тела / А. В. Панин [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. № 1. – С. 83–92.

99. Приходько, В. М. Инновационные технологии ультразвуковой обработки / В. М. Приходько, Р. И. Нигметзянов, Д. С. Фатюхин // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 7. – С. 15–20.

100. Баранов, В. П. Кинетика накопления микроповреждений в нагруженных конструкционных сталях повышенной и высокой прочности / В.

П. Баранов, Н. Н. Сергеев, В. Э. Степанова, М. В. Пузикова // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – № 1. – С. 190–201.

102. Натчук, А. И. Применение ультразвука в производстве и термической обработке сплавов / А. И. Натчук. – Москва: изд. ЦП НТО МАШПРОМ, 1961. – №2 – С. 26–34.

103. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – Москва: Машиностроение, – 1978. – 152 с.

104. Глезер, А. М. Новый подход к описанию структурно-фазовых превращений при очень больших пластических деформациях / А. М. Глезер // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – № 5. – С. 36–46.

105. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учебник для машиностроительных ВУЗов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва: Машиностроение, – 2009. – 493 с.

106. Браславский, В. М. Технология обработки круглых деталей роликами / В. М. Браславский. – Москва: Машиностроение, – 1975. – 160 с.

107. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Авергенков. – Минск: Наука и техника, – 1977. – 256 с.

108. Харламов, Ю. А. Методы модифицирования поверхностных слоев деталей машин и инструментов / Ю. А. Харламов // Современное машиностроение. – 2000. – № 3 - 4. – С. 9–17.

109. Булат, С. И. Деформируемость структурно-неоднородных сталей и сплавов / С. И. Булат, А. С. Тихонов, А. И. Дубрович. – Москва: Металлургия, – 1975. – 352 с.

110. Подзея, А. В. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзея. – Москва: Машиностроение, – 1973. – 212 с.

111. Приходько, В. М. О моделировании колебаний кавитационной полости / В. М. Приходько, А. П. Буслаев, С. Б. Норкин // Тр. 8-й сессии Акуст. об-ва. Н. Новгород, – 1998. С. 164–167.
112. Эванс, А. Эрозия / А. Эванс. Пер. с англ. – Москва: Мир, – 1982. – 464 с.
113. Aleksandrov, V. A. Shortening of the process of nitriding of corrosion-resistant steels / V. A. Aleksandrov, A. V. Grachev, S. I. Barabanov // Metal Science and Heat Treatment, 2011. – 53(7–8). – С. 344–346.
114. Приходько, В. М. Ультразвук в гибридных технологиях производственных процессов / В. М. Приходько, Д. С. Симонов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3(77). – С. 191–196.
115. Подзей, А. В. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей, А. М. Сулима, М. И., Евстигнеев, Г. З. Серебренников. – Москва: Машиностроение, – 1973. – 216 с.
116. Приходько, В. М. Применение гибридных ультразвуковых технологий для получения функциональных покрытий: монография / В. М. Приходько, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, Д. С. Фатюхин, А. В. Сухов, Д. С. Симонов – Москва: Техполиграфцентр, 2023. – 199 с.
117. Приходько, В. М. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография / В. М. Приходько, И. А. Медеяев. Д. С. Фатюхин. – Москва: МАДИ. – 2015. – 264 с.
118. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – Москва: Машиностроение, – 2000. – 320 с.
119. Кузнецов, Н. Д. Технологические методы повышения надежности деталей машин / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин, В. И. Волков. – Москва: Машиностроение, – 1993. – 304 с.
120. Каледин, Н. А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием / Н. А. Каледин, П. А. Чеп. – Минск: Наука и техника. 1974. – 232 с.

121. Казанцев, В. Ф. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование твердых тел / В. Ф. Казанцев, Б. А. Кудряшов, Р. И. Нигметзянов, В. М. Приходько, Д. С. Фатюхин // Вестник ХНАДУ. – 2009. – №46. – С. 7–9.

122. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – Москва: Машгиз, – 1963. – 232 с.

123. Чудина, О. В. Комбинированная технология поверхностного упрочнения конструкционных сталей (закалка ТВЧ + ультразвуковая обработка) / О. В. Чудина, В. М. Приходько, Д. С. Симонов, П. Брингулис // СТИН. – 2022. – № 9. – С. 19–22.

124. Муханов, И. И. Влияние упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом на контактную выносливость закаленных сталей / И. И. Муханов, К. Б. Куроедов // Опыт промышленного применения ультразвуковой техники и технологии. – Москва, – 1976. – С. 100–104.

125. Приходько, В. М. Применение принципов структурной теории прочности при разработке технологий поверхностного упрочнения, сочетающий закалку ТВЧ и ультразвуковое ППД / В. М. Приходько, О. В. Чудина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 5. – С. 27–32.

126. Асташев, В. К. О влиянии высокочастотной вибрации на процессы пластического деформирования / В. К. Асташев // Машиноведение. – 1983. – № 2. – С. 3–11.

127. Иванова, В. С. Итоги науки и техники, прочность и пластичность / В. С. Иванова, Л. Р. Ботвина. МИТОМ. – 1971. – 170 с.

128. Иванов, А. Н. Интегральные рентгеновские методы анализа дислокационной структуры и их применение для металлических конструкционных материалов: дисс. на соиск. учен. степ. док. физ-мат. наук: 01.04.07 / Иванов Александр Николаевич; – Москва, – 1989. – 249 с.

129. Способ упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: патент №1543768 СССР: МПК В24В 39/00 / авторы Макушок Е. М., Дмитриевич Е. И., Калиновская Т. В., Красневский С. М.,

Вильнер М. Н., Мозалев В. В., Пширков В. Ф., Рыковский Б. П., Журавлева А. А., Быков А. М.; патентообладатель Физико-технический институт АН БССР опубл. 2013г.

130. Способ комбинированной обработки точением и поверхностным пластическим деформированием: патент № 2503532 С1 Российская Федерация: В24В 39/04 / авторы и заявители Киселев Е. С., Благовский О. В., Кабиров Р. С.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет" опубл. 10.01. 2014.

Фз. 03.02/46 3-кв №-2023г
02.05.2023г П-№04-1023г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2794512

**Способ комбинированной обработки деталей
поверхностно-пластическим деформированием с
использованием ультразвуковых колебаний**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)" (RU)*

Авторы: *Приходько Вячеслав Михайлович (RU), Симонов
Дмитрий Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022117488

Приоритет изобретения 28 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 апреля 2023 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 28 июня 2042 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022666260

**Расчет поверхностно-пластического деформирования с
ультразвуком по заданным параметрам**

Правообладатель: *Симонов Дмитрий Сергеевич (RU)*

Авторы: *Симонов Дмитрий Сергеевич (RU), Еришов
Владимир Сергеевич (RU), Акулов Алексей Андреевич
(RU), Талдыкин Дмитрий Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022665524

Дата поступления **16 августа 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **29 августа 2022 г.**



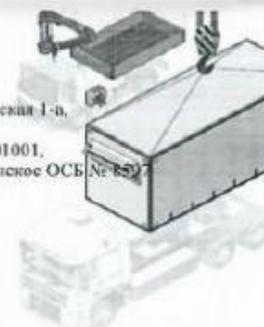
*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e34e3f93a94e0bd24145d5c7
Владелица **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



Россия, Челябинская обл. г. Миасс, ул. Севастопольская 1-б,
 тел/факс: (3513) 24-07-11, 24-13-11
 ОГРН 1107415002078, ИНН 7415069926, КПП 741501001,
 р/с 40702810872090055963, БИК 047501602, Челябинское ОСБ № 859
 www.gird.ru



СПРАВКА

Об использовании результатов диссертационного исследования Симонова Дмитрия Сергеевича по теме «Повышение эффективности поверхностного пластического деформирования нежестких валов комбинированными ультразвуковыми технологиями»

Результаты исследования полученные Симоновым Д.С. рассмотрены на совете руководителей организации ООО "ГИРД-Автофургон" и вынесено положительное решение о внедрении в производство отдельных результатов исследования, а именно:

- рекомендации по комбинации методов ультразвукового ППД термообработанных ТВЧ образцов приводит к увеличению микротвердости на 40 ÷ 80% и достигает 9300 МПа. Такой технологический результат, по-видимому, связан с созданием в поверхностном слое металла мелкоблочной структуры с более равномерным распределением дислокаций за счет термической активации движения дислокаций, что приводит к повышению износостойкости;

- при различных видах комбинирования ППД происходит повышение комплекса механических свойств стали 45. При ультразвуковой обработке износостойкость увеличивается в 1,6 раза, при ТВЧ нагретого образца более чем в 2 раза, при ТВЧ+УЗО при непрерывной передаче колебаний – в 3 раз, при комбинации ультразвуковой и импульсной в 3,2 раза, при этом глубина упрочненного слоя при всех вариантах обработки колеблется от 0,6 до 1,2 мм.

- с целью повышения эффективности ультразвукового ППД длинномерных деталей за счет повышения производительности и их равномерной обработки разработан способ комбинированной обработки ППД с ультразвуком (патент №2794512 от 19 апреля 2023), заключающийся в использовании одновременно двух инструментов – инденторов, установленных со смещением кратным 0,5 λ _{пр}, одному из которых сообщаются ультразвуковые колебания.

- на основе проведенных исследований разработаны комбинированные технологические процессы ППД с применением ультразвука. Технологии переданы для опытно-промышленного внедрения. Ожидаемый экономический эффект складывается из применения недорогих сталей, сокращения количества операций и повышения производительности технологического оборудования.

Заместитель директора
 ООО "ГИРД-Автофургон"

 М.С. Белоус


- 1 Успешный опыт работы (12 лет)
- 2 Наличие собственной продукции на складе
- 3 На все продукция выносятся сертификаты и ОТС
- 4 Индивидуальная клиентская служба
- 5 Контроль качества на каждом этапе производства продукции
- 6 Применение сертифицированных материалов и импортной комплектующей
- 7 Возможность подключения квеского оборудования на месте заказчика