

На правах рукописи



**САМУЛЬ Артём Геннадьевич**

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ  
ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИ  
ПОВЕРХНОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:**

**Рахимянов Харис Магсуманович**

доктор технических наук, профессор

**Гилета Виктор Павлович**

кандидат технических наук, доцент,

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,

доцент кафедры технологии машиностроения

**Официальные оппоненты: Блюменштейн Валерий Юрьевич**

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачёва»,

профессор кафедры технологии

машиностроения (г. Кемерово)

**Лебедев Валерий Александрович**

кандидат технических наук, профессор,

ФГБОУ ВО «Донской государственный

технический университет»,

и.о. заведующего кафедрой металлорежущих

станков и инструментов (г. Ростов-на-Дону)

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Самарский национальный

исследовательский университет им.

академика С.П. Королева» (г. Самара)

Защита состоится 14 декабря 2023 года в 11.00 на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу <https://www.istu.edu>.

Автореферат разослан 16 октября 2023 года.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

Е-mail: [vulix2011@yandex.ru](mailto:vulix2011@yandex.ru)

Тел./факс: (3952)40-51-17

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент



Н.В. Вулых

## Общая характеристика диссертационной работы

Современное развитие науки и техники сопровождается увеличением номенклатуры и ужесточением условий эксплуатации изготавливаемых машин и механизмов. Такие наукоёмкие области как авиа-, машино- и приборостроение характеризуются широким применением металлов и сплавов различной твёрдости. К таким изделиям относятся, например, корпуса теплонагруженных усилителей мощности сверхвысокой частоты, изготавливаемые из латунного сплава Л68. При этом требуется обеспечение высоких эксплуатационных свойств изделий за счёт подбора рациональных конструктивных решений и материалов, так и совершенствования технологии производства деталей. Одним из путей повышения эксплуатационных показателей является формирование поверхностей с требуемыми микрогеометрическими и физико-механическими параметрами, отличными от основного материала детали. Придание наиболее рациональных свойств, с точки зрения эксплуатационных условий, поверхностного слоя позволяет повысить надёжность и долговечность изделия.

Итоговое состояние поверхностного слоя, а именно его микрогеометрические и физико-механические параметры, формируется с помощью финишных методов обработки. Традиционно в качестве этих методов выступают методы, основанные на резании металла. Недостатком данного вида обработки является формирование на поверхности детали микрогеометрии с острыми вершинами и впадинами, имеющей низкую несущую способность, без существенного изменения твёрдости поверхности. Обеспечение формирования поверхностных слоёв с повышенными эксплуатационными свойствами возможно за счёт альтернативных методов обработки – химических, химико-термических, термических, путём нанесения покрытий, так и методов поверхностного пластического деформирования.

Перспективными, с целью формирования поверхностного слоя деталей, со специфическими микрогеометрическими и физико-механическими свойствами являются методы (ППД), основанные на поверхностном пластическом деформировании. Основным отличием ППД от методов резания является то, что обработка происходит без снятия материала, за счёт его перераспределения в тонком поверхностном слое. За счёт этого обеспечивается формирование поверхностного слоя, характеризующегося повышенной твёрдостью и коррозионной стойкостью, наличием остаточных напряжений сжатия, при одновременном достижении низких микрогеометрических параметров поверхности. Данные методы являются управляемыми, обладают высокой производительностью и низкой себестоимостью. При этом применение ППД не связано с действием вредных для окружающей среды факторов, что говорит об их экологичности.

Одним из перспективных методов ППД является поверхностное пластическое деформирование инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой (УЗПД). Применение данного метода позволяет интенсифицировать

пластическое течение материала поверхностного слоя, при обеспечении выглаживающего и упрочняющего эффекта на деталях, из широкой номенклатуры деталей с твёрдостью выше HB150. Использование малого статического нагружения при УЗПД позволяет обрабатывать нежесткие, тонкостенные детали. Наличие большого количества технологических параметров позволяет управлять итоговым микрогеометрическим и физико-механическим состоянием обработанных поверхностей в широком диапазоне.

Несмотря на большое количество исследований УЗПД, большинство из них осуществлялось на деталях, выполненных из металлов и сплавов средней и высокой твёрдости, и в тоже время недостаточное внимание уделено обработке пластичных металлов и сплавов (с твёрдостью менее HB150). Поскольку эти материалы широко распространены в важных для народного хозяйства областях и существенно отличаются от металлов и сплавов средней и высокой твёрдости, то определение возможности формирования стабильного качества поверхностного слоя деталей, выполненных из этих материалов, требует дополнительных исследований ультразвукового поверхностного пластического деформирования.

**Цель работы:** разработка технологии формирования поверхностных слоёв с повышенными требованиями к уровню микрогеометрических и физико-механических характеристик на деталях из пластичных металлов и сплавов методом ультразвукового поверхностного пластического деформирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд **задач**:

1. Выбрать рациональную схему ультразвукового поверхностного пластического деформирования для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов.
2. Разработать и создать установку для реализации УЗПД выбранной схемы обработки.
3. Установить теоретические закономерности формирования топографии поверхности при УЗПД, и на их основе разработать математическую модель её формирования.
4. Экспериментально изучить влияние технологических параметров УЗПД на микрогеометрическое состояние обработанной поверхности, и разработать математическую модель формирования микрогеометрии при УЗПД.
5. Экспериментально изучить влияние технологических параметров УЗПД по выбранной схеме на физико-механическое состояние поверхностного слоя обрабатываемых деталей, выявить ограничивающие факторы.
6. Оценить изменение эксплуатационных свойств деталей после УЗПД.
7. Разработать алгоритм управления процессом и технологические рекомендации по применению УЗПД для обработки пластичных металлов и сплавов, провести промышленную апробацию результатов исследования.

### **Объект исследования**

Технологический процесс поверхностного пластического деформирования инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой.

### **Предмет исследования**

Закономерности формирования микрогеометрического и физико-механического состояния поверхностного слоя деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов, ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием.

### **Научная новизна**

1. Установлено, что изменение схемы УЗПД с нормальной на тангенциальную, обеспечивает формирование стабильного качества поверхностного слоя с низкими параметрами шероховатости и повышенными физико-механическими свойствами на деталях, выполненных из пластичных металлов и сплавов.

2. Разработана математическая модель формирования топографии поверхности при УЗПД по тангенциальной схеме, учитывающая влияние исходной твёрдости обрабатываемого материала и шероховатости поверхности, кинематические и динамические параметры обработки.

3. На основании экспериментальных исследований и расчётных данных установлены закономерности формирования поверхностного слоя с заданным уровнем микрогеометрических и физико-механических свойств деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов, УЗПД по тангенциальной схеме.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработан алгоритм управления процессом УЗПД по тангенциальной схеме и технологические рекомендации по выбору режимов обработки для формирования характеристик качества поверхностного слоя деталей.

2. Установлено, что для УЗПД по тангенциальной схеме технологическими параметрами обработки, оказывающими влияние на микрогеометрическое и физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей, являются скорость главного движения  $V_V$ , подача инструмента  $S$ , статическая нагрузка  $P_{ст}$ , частота  $f$  и амплитуда  $A$  ультразвуковых колебаний, радиус рабочего инструмента  $r_1$ , угол  $\beta$  между скоростями главного движения и колебательной скорости.

3. Результаты диссертационной работы внедрены для повышения эксплуатационных свойств корпусов теплонагруженных СВЧ усилителей мощности.

4. Результаты экспериментальных и теоретических исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 15.03.05 и 15.04.05 "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств".

### **Достоверность результатов**

Обеспечение достоверности полученных результатов обусловлено использованием современного экспериментального оборудования,

применением методов математической статистики для оценки погрешности измерений, математическим моделированием формируемого микрогеометрического состояния поверхности, достоверность которого подтверждена сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Выявленные в результате кинематического и силового анализа УЗПД по тангенциальной схеме особенности движения рабочего инструмента относительно обрабатываемой поверхности и характера действующих сил в зоне деформирования.

2. Выбор УЗПД по тангенциальной схеме как рационального метода ППД, обеспечивающего формирование поверхностных слоёв с повышенными микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками на деталях из пластичных металлов и сплавов.

3. Математическая модель формирования топографии поверхности при УЗПД по тангенциальной схеме деталей из пластичных металлов и сплавов.

4. Аналитические и эмпирические зависимости влияния технологических параметров УЗПД на геометрические параметры поверхности.

5. Результаты оценки влияния угла  $\beta$  ввода ультразвуковых колебаний инструмента относительно вектора скорости главного движения на микрогеометрическое и физико-механическое состояние поверхности.

6. Технологические рекомендации по применению УЗПД по тангенциальной схеме для формирования микрогеометрического и физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей.

**Личный вклад автора**

Обоснован выбор рациональной схемы ультразвукового поверхностного пластического деформирования для деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов, разработана модель топографии поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме, спроектирована и изготовлена установка для тангенциальной схемы ультразвукового поверхностного пластического деформирования, выполнены экспериментальные исследования и разработаны технологические рекомендации для использования УЗПД по тангенциальной схеме в промышленности, проведён анализ и обобщение результатов исследования, сформулированы выводы и положения, выносимые на защиту.

**Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения по следующим направлениям:

2 – Технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие ходы, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости.

3 – Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения.

4 – Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска.

7 – Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: IV Всероссийской конференции молодых ученых "Наука и инновации XXI века" (г. Сургут, 2017 г.), III Всероссийской молодежной научно-практической конференции "Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении" (г. Кемерово, 2017 г.), X Международной научно-практической конференции "Инновации в машиностроении" (г. Кемерово, 2020 г.), международной научно-практической конференции аспирантов и магистрантов "*Science. Research. Practice*" (г. Новосибирск, 2018 г.), международной научно-практической конференции аспирантов и магистрантов "*Progress through Innovations*" (г. Новосибирск, 2019), 11 международной научно-практической конференции "Инновации в машиностроении" (г. Бийск, 2020 г.), Международной научно-технической конференции "Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021" (г. Севастополь, 2021 г.), XXVIII Международной научно-технической конференции "Машиностроение и техносфера XXI века" (г. Севастополь, 2021 г.), XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Жизненный цикл конструкционных материалов" (г. Иркутск, 2021 г.), XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России (г. Новосибирск, 2021).

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования отражены в 19 публикациях, из них 3 работы входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК, и 3 статьи в изданиях, индексируемых в базах *WoS* и *Scopus*.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 113 наименований. Работа содержит 203 страницы машинописного текста, включая 127 рисунков и 5 таблиц; имеется 6 приложений.

### **Содержание работы**

**Во введении** приведено обоснование актуальности обеспечения качества поверхностного слоя деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов, ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием, приведены цель и задачи исследования, определена научная новизна, изложена практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ состояния вопроса обеспечения качества поверхностного слоя деталей методами ППД. Сравнительный анализ позволил установить границы применимости различных методов и взаимосвязь

технологических параметров обработки с свойствами деформируемых поверхностей. На основании физико-механических особенностей ультразвука аргументирована перспективность применения УЗПД в качестве финишного метода обработки.

Проанализированы существующие математические модели процесса УЗПД, позволяющие прогнозировать итоговое состояние поверхностного слоя после обработки. Данные модели учитывают взаимосвязь технологических параметров ультразвукового деформирования со свойствами формируемой поверхности. Установлено, что приведённые модели УЗПД применимы для обработки металлов и сплавов средней и высокой твёрдости ( $>HB150$ ). В литературе практически отсутствуют исследования, связанные с обеспечением качества поверхностного слоя изделий, выполненных из материалов с твёрдостью ниже HB150. Поскольку современное развитие машиностроения характеризуется широким применением пластичных металлов и сплавов, многие из которых являются цветными, то остаётся не исследован вопрос применения УЗПД для обеспечения упрочняюще-чистового эффекта на деталях, изготовленных из данных материалов.

Изменение усилия нагружения, с целью уменьшения деформационного эффекта не является оптимальным решением данной проблемы. В данном случае становится затруднительным обеспечение упрочняюще-чистового эффекта поверхностей деталей из пластичных металлов и сплавов за один проход. Одним из путей решения данной проблемы является изменение условий нагружения в очаге деформирования, за счёт смены направления ввода ультразвуковых колебаний.

На основании приведённых данных были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** рассмотрены кинематические особенности различных схем УЗПД. На основании математического описания кинематики процесса УЗПД по тангенциальной схеме выявлено, что смена направления ввода колебаний с нормального на тангенциальное приводит к изменению величины и направления результирующей скорости обработки, что приводит к постоянству контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью (рисунок 1). При этом инструмент совершает сложное движение относительно обрабатываемой детали. Установлено, что угол ввода колебаний ( $\beta$ ) относительно вектора скорости главного движения является дополнительным технологическим параметром УЗПД по тангенциальной схеме. Описано влияние  $\beta$  на изменение кинематических параметров обработки, а именно на величину и направление как скорости движения инструмента, так и ускорения.



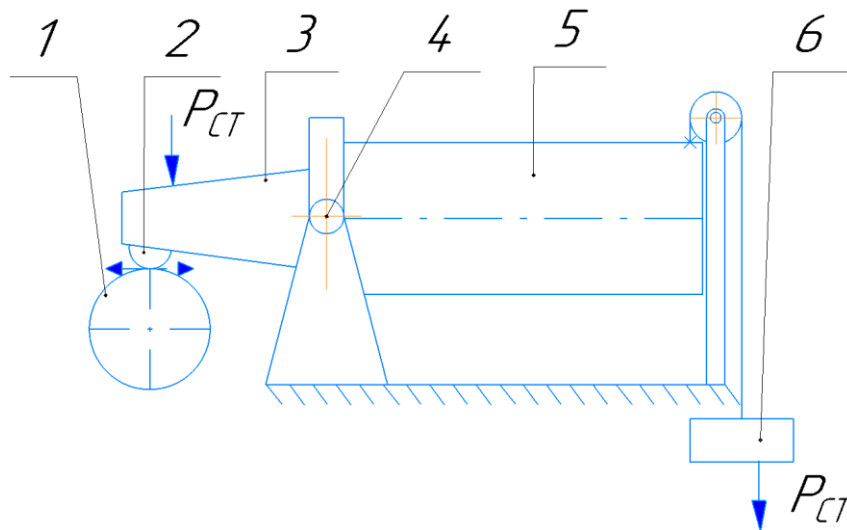


Рисунок 1 – Схема установки для УЗПД по тангенциальной схеме  
 1 – обрабатываемая деталь, 2 – индентор, 3 – волновод, 4 – ось качания, 5 – магнестрикционный преобразователь, 6 – груз,  $P_{ст}$  – статическая нагрузка

На основании законов, описывающих поведение инструмента при наложении на него колебательного движения, были выведены закономерности, характеризующие траекторию перемещения деформатора по обрабатываемой поверхности, с учётом характера взаимного расположения соседних следов.

Выведена система уравнений, характеризующих траекторию перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности:

$$\begin{cases} Z_i = Sn(t + \frac{60}{n}(N_i - 1)) + A \sin(2\pi f(t + \frac{60}{n}(N_i - 1)) \sin \beta \\ X_i = \pi Dnt + A \sin(2\pi ft) \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

где  $S$  – подача,  $n$  – обороты,  $t$  – время,  $N_i$  – номер оборота детали,  $f$  – частота колебаний,  $D$  – диаметр обрабатываемой детали,  $\beta$  – угол ввода колебаний относительно вектора скорости главного движения.

Приведено описание влияния расположения и формы соседних следов на итоговое состояние обработанной поверхности, на основании которых разработана модель формирования топографии поверхности при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании по тангенциальной схеме, позволяющая прогнозировать микрогеометрическое состояние обработанной поверхности. Установлено, что изменение технологических параметров процесса УЗПД приводит к различным картинам расположения следов на упрочнённой детали, обуславливающих изменение её микрогеометрического состояния. Полученные выражения позволяют прогнозировать топографическое строение поверхности, с учётом формирования частичной или полностью новой микрогеометрии. Выявлено, что наложение соседних следов инструмента приводит к формированию зон, подвергаемых нагружению в большей степени, ввиду перекрытия следов. При этом на поверхности формируется сложная упорядоченная картина, характеризующая итоговое состояние обработанной поверхности (рисунок 2).

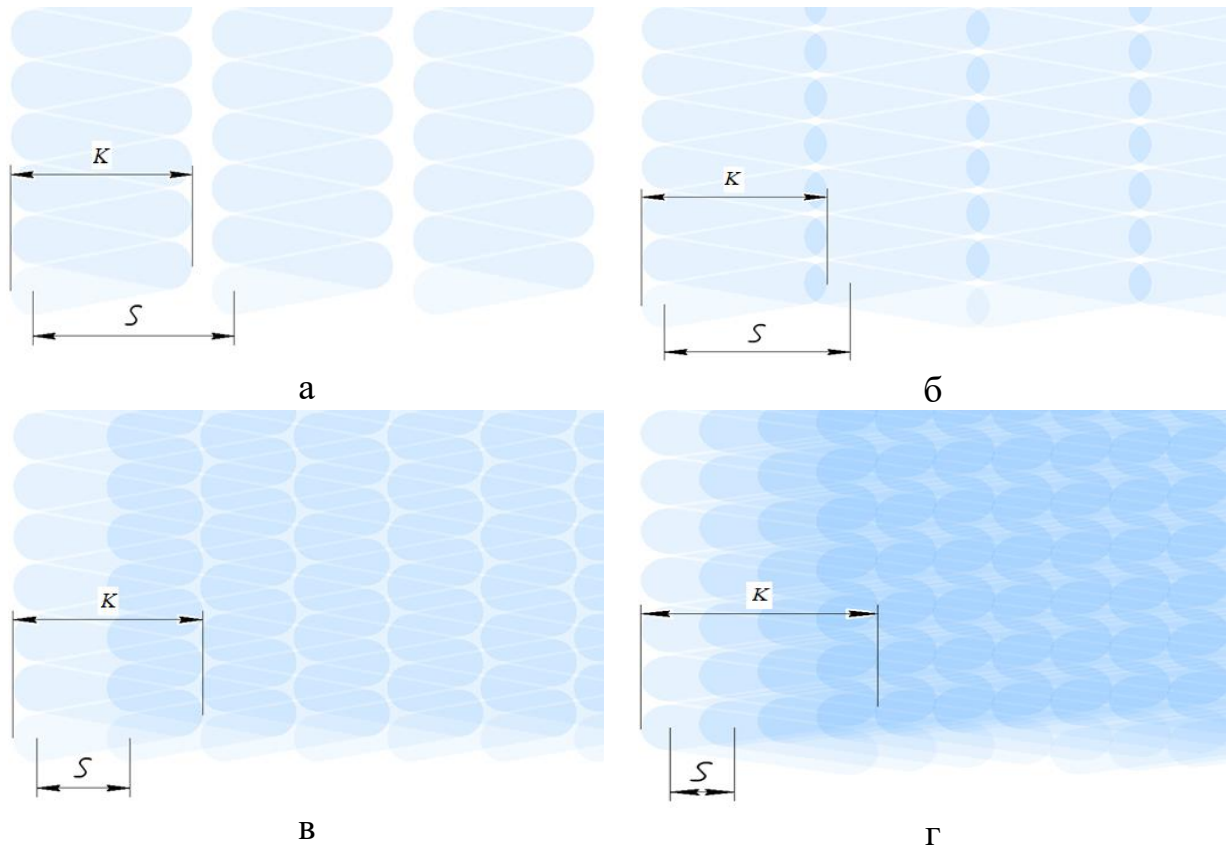


Рисунок 2 – Топография поверхности при различных сочетаниях ширины следа  $b$ , подачи  $S$ , и фазового сдвига  $m$ : а –  $K/S < 1$ ,  $m = 0$ ; б –  $K/S = 1$ ,  $m = 0,5$ ; в –  $K/S > 1$ ,  $K = 2S$ ,  $m = 0$ ; г –  $K/S > 1$ ,  $K = 4S$ ,  $m = 0,5$

Путём уточнения имеющихся закономерностей влияния зависимости геометрических параметров зоны деформации от прилагаемой нагрузки, с учётом ультразвукового воздействия, выведены выражения для определения глубины и площади следа, оставляемого инструментом. Согласно имеющимся исследованиям, наличие интенсивного колебательного движения инструмента, направленного тангенциально к обрабатываемой поверхности, уменьшает силы трения в зоне контакта. Это приводит к увеличению глубины и площади следа, что подтверждено экспериментально. Очевидно, это связано с осциллирующим движением инструмента, обусловленного кинематическими особенностями процесса УЗПД тангенциальной схеме, приводящим к уменьшению энергетических затрат на тепловые потери и более активному перераспределению материала основы, за счёт освободившейся деформационной силы.

Установлено, что смена значения угла между векторами скорости колебательного движения и скорости главного движения приводит к изменению геометрических параметров формируемого следа. Приведённые экспериментальные данные коррелируют с теоретическими, при этом наблюдается увеличение ширины канавки с ростом значения угла  $\beta$ . Это доказывает утверждение о том, что угол ввода колебаний относительно вектора скорости главного движения является дополнительным технологическим параметром процесса УЗПД по тангенциальной схеме (рисунок 3).

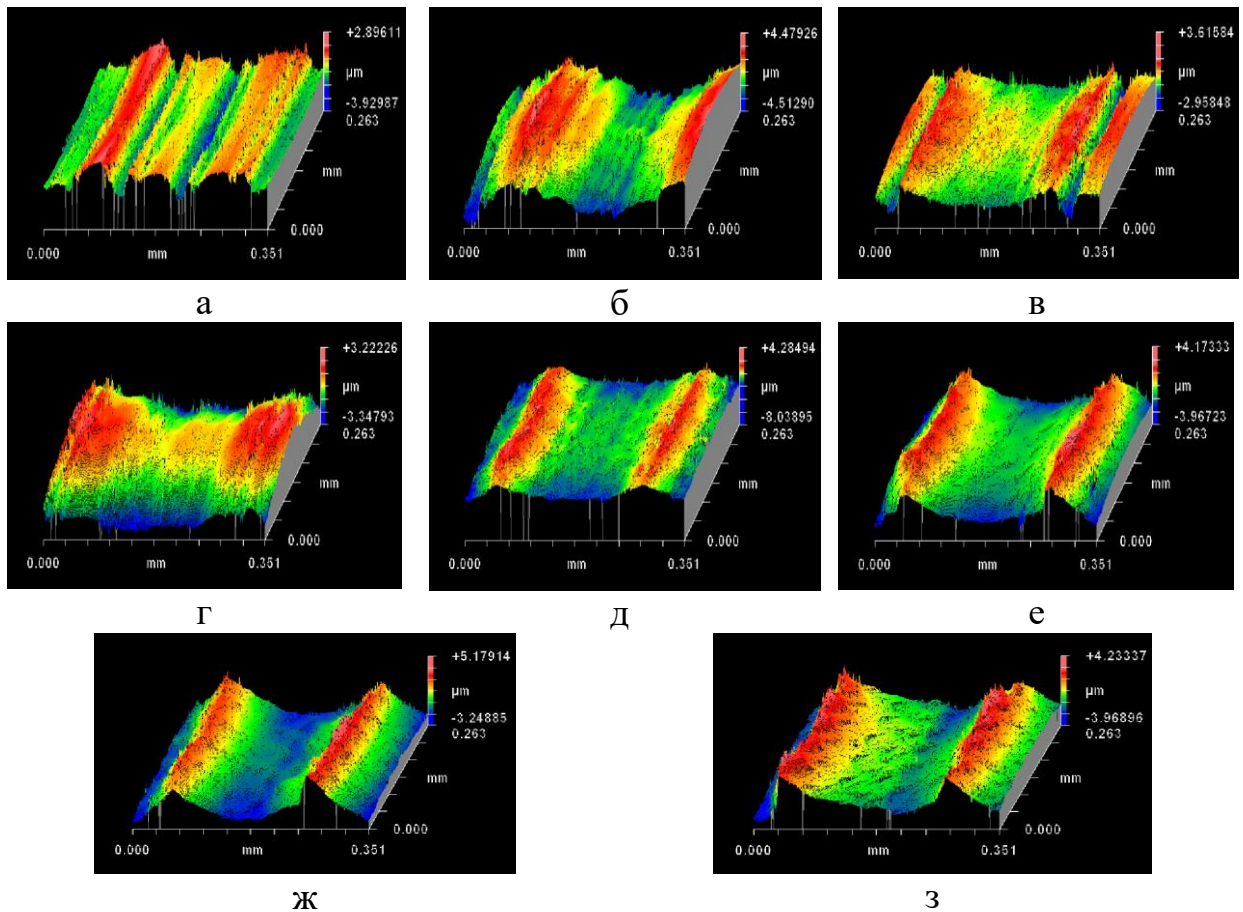


Рисунок 3 – Влияние  $\beta$  на ширину следа ( $P_{ст} = 80$  Н,  $S = 0,3$  мм/об,  $V_V = 62,8$  м/мин): а – АВ; б – УЗПД  $\beta = 0^\circ$ ; в – УЗПД  $\beta = 15^\circ$ ; г – УЗПД  $\beta = 30^\circ$ ; д – УЗПД  $\beta = 45^\circ$ ; е – УЗПД  $\beta = 60^\circ$ ; ж – УЗПД  $\beta = 75^\circ$ ; з – УЗПД  $\beta = 90^\circ$ )

**Третья глава** посвящена техническому обеспечению УЗПД по тангенциальной схеме. Спроектирована и разработана установка для реализации УЗПД по тангенциальной схеме на базе токарно-винторезного станка 250ИТВМ. В процессе подготовки исследований были произведены расчёты и изготовление волноводов, необходимых для передачи колебаний от магнитострикционного преобразователя к деформирующему элементу. В качестве деформирующих материалов подготовлены инденторы из алмаза синтетического поликристаллического (АСПК).

Изложены методики подготовки и проведения исследований, обоснован выбор материала и формы исследуемых образцов, с установленными исходными параметрами их поверхностей. Для подтверждения достоверности получаемых результатов при помощи оптического эмиссионного спектрометра *ARL 3460 Quantris* был проведён химический анализ исследуемых материалов, в ходе которого установлено, что обрабатываемые металлы и сплавы соответствуют наименованию.

Металлографические исследования проводились на инструментальном микроскопе *Axiovert 40 MAT*. Определено исходное состояние микроструктуры образцов с целью их сравнения с результатами после УЗПД. Исследования проводились на предварительно подготовленных металлографических шлифах. Их заливка осуществлялась на гидравлическом прессе *Buehler*

*SimpliMet 1000*, после чего осуществлялась полировка на шлифовально-полировальном станке *Buehler AutoMet 300*.

Оценка физико-механического состояния обеспечивалась дюраметрическими исследованиями и определением уровня, знака и глубины остаточных напряжений. Исследование изменения микротвёрдости по поверхности и глубине осуществлялось методом Виккерса на микротвердомере ПМТ-3.

Изучение геометрических параметров производилась путём определения влияния УЗПД на изменение формы, волнистости и шероховатости поверхности. Отклонение от круглости цилиндрических образцов исследовалось на контрольно-измерительной машине *Zeiss Contura*, параметры волнистости и шероховатости определялись с помощью профилограмм, полученных на профилометре *MarSurf 10PS*. Рельеф, формируемый после применения УЗПД анализировался на комплексе изучения топографии *ZIGO NewView 7300* и оптическом микроскопе *Axiovert 40 MAT*.

Влияние УЗПД на изменение эксплуатационных свойств определялось исследованием износостойкости и деформационных характеристик. Триботехнические испытания проводились на машине трения ИИ 5018, а оценка деформационных свойств на универсальной сервогидравлической установке *BISS UT-100*.

Экспериментальное определение геометрических параметров поверхностей, обработанных УЗПД, описано в **четвёртой главе**. Установлено, что применением ультразвукового поверхностного пластического деформирования по тангенциальной схеме возможно формирование рационального микрогеометрического состояния поверхности деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов. Благоприятное влияние УЗПД на точность геометрической формы обрабатываемых деталей, обусловлено незначительным уменьшением значения отклонения от круглости в поперечном сечении цилиндрических деталей.

Установлено, что наложение ультразвуковых колебаний на деформирующий инструмент приводит к уменьшению высотных и увеличению шаговых параметров волнистости. Анализ показал, что формы профилей волнистости поверхности после алмазного выглаживания (АВ) и УЗПД различны. Профиль после АВ представляет собой набор полуволн синусоид, имеющих локальные выпуклости и впадины. Применение УЗПД приводит к формированию плосковершинных кривых, на которые наложены кривые более высоких гармоник, при этом в чередовании местных выпуклостей и впадин появляется периодичность. Известно, что регуляризация профиля оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства деталей. Установлено, что значительное влияние на высотные и шаговые параметры волнистости оказывает угол ввода колебаний относительно вектора скорости главного движения. При увеличении значения параметра  $\beta$  от 0 до 90° наблюдается увеличение шаговых параметров волнистости, что объясняется более активным движением материала в сторону

подачи, обуславливая его лучшее распределение в заданном направлении. Взаимосвязь изменения высотных параметров волнистости от изменения угла  $\beta$  носит экстремальный характер. Наименьшие значения  $Wz$  и  $Wp$  наблюдаются при  $\beta = 0$  и  $90^\circ$ , а максимальные при  $\beta = 45^\circ$ .

Оценка микрогеометрических показателей поверхности позволила установить воздействие УЗПД на параметры шероховатости. Экспериментально доказано, что применение УЗПД по тангенциальной схеме приводит к уменьшению высотных параметров шероховатости.

По результатам экспериментальных данных, и их обработки методом множественной линейной регрессии в программном обеспечении *MatLab*, были получены эмпирические зависимости влияния параметров УЗПД по тангенциальной схеме на параметры  $Ra$  и  $Sm$  (рисунок 4, 5).

$$Ra = 1,129 - 0,0444P - 23,62S + 0,00056P^2 + 0,971P \cdot S + 161,8S^2 - 1,294 \cdot 10^{-6}P^3 - 0,0119P^2S - 7,107PS^2 + 1,408 \cdot 10^{-9}P^4 + 4,947 \cdot 10^{-6}P^3S + 0,1125P^2S^2 - 8,558 \cdot 10^{-11}P^5 + 3,689 \cdot 10^{-7}P^4S - 0,00054P^3S^2 + Ra(\beta) \quad (2)$$

где  $Ra(\beta)$  – зависимость параметра  $Ra$  от изменения угла ввода колебаний  $\beta$ , описываемое выражением

$$Ra(\beta) = -0,6083 \cdot \left| \cos\left(0,0712\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \right| + 0,5726 \cdot \left| \sin\left(0,0712\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \right| + 0,0924 \cdot \left| \cos\left(0,1428\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \right| - 0,0708 \cdot \left| \sin\left(0,1428\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \right| - 0,1677 \cdot \left| \cos\left(0,2142\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \right| - 0,0437 \cdot \left| \sin\left(0,2142\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \right| \quad (3)$$

$$Sm = 61,89 - 2,734P + 480,7S + 0,1061P^2 - 4,454PS - 3347S^2 - 0,0011P^3 - 0,1525P^2S + 119,4PS^2 + 4,127 \cdot 10^{-6}P^4 + 0,0014P^3S - 0,8233P^2S^2 + Sm(\beta) \quad (4)$$

где  $Sm(\beta)$  – зависимость параметра  $Sm$  от изменения угла ввода колебаний  $\beta$ , описываемое выражением

$$Sm(\beta) = -0,0001|\beta - 90|^3 + 0,028|\beta - 90|^2 - 0,0623|\beta - 90| \quad (5)$$

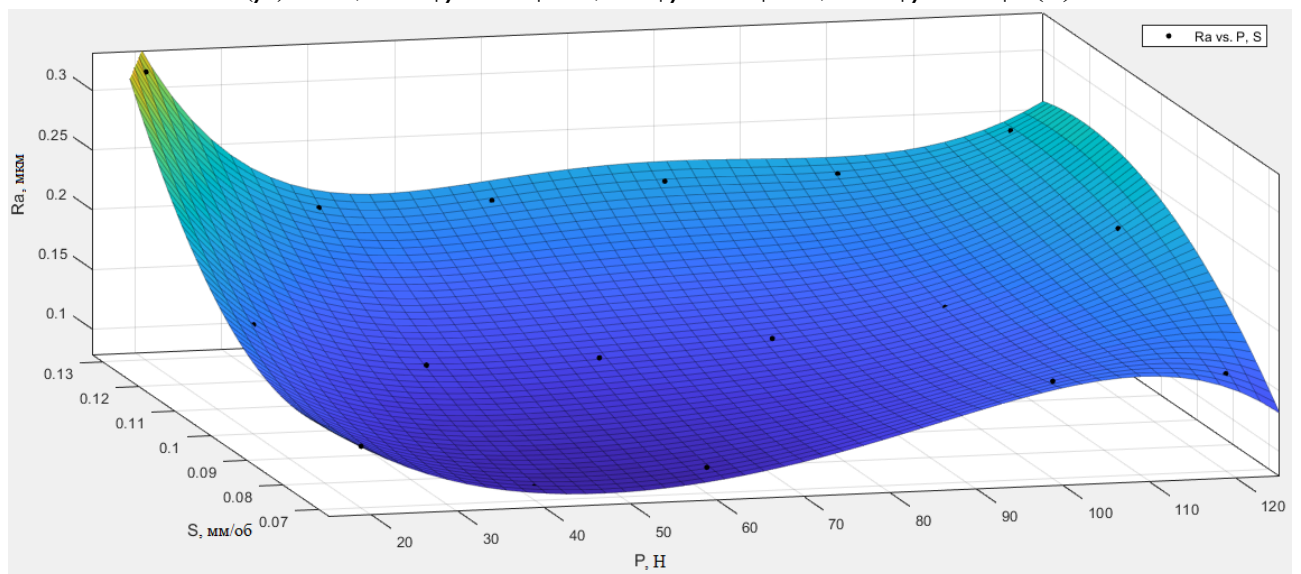


Рисунок 4 – Изменение значения  $Ra$  от параметров обработки  $S$  и  $P_{ст}$

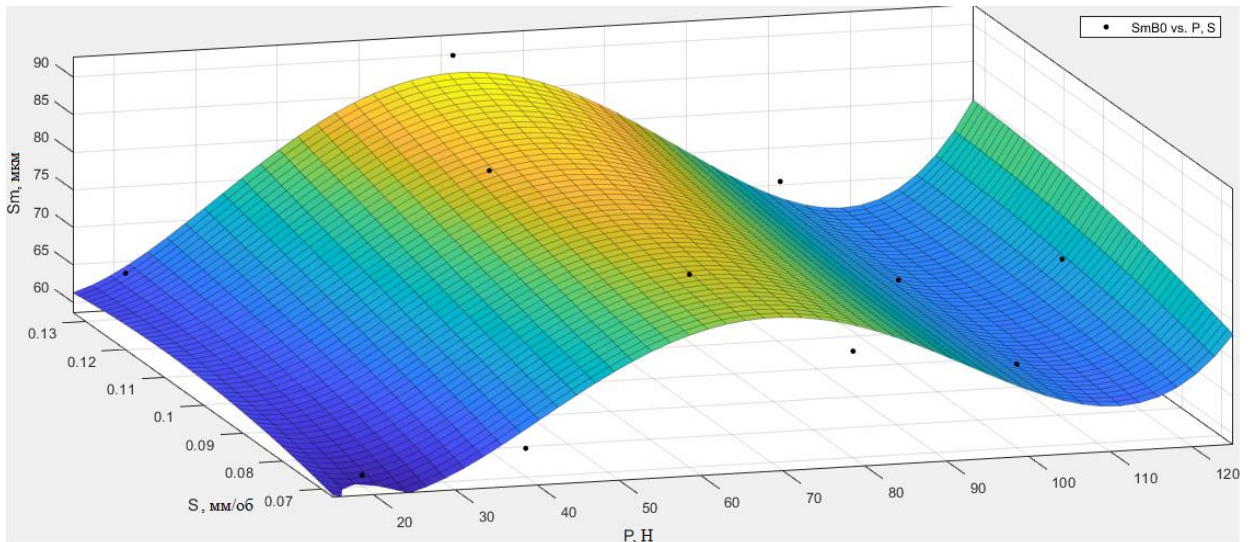


Рисунок 5 – Изменение значения  $Sm$  от параметров обработки  $S$  и  $P_{CT}$

Определено рациональное значение прилагаемого статического нагружения, при котором обеспечивается достижение наименьших высотных и наибольших шаговых параметров шероховатости поверхности, для каждого материала: Д16 –  $P_{CT} = 20$  Н; Д16Т –  $P_{CT} = 60$  Н; 10895 –  $P_{CT} = 100$  Н; Л68 –  $P_{CT} = 160$  Н ( $r_1 = 4$  мм,  $A = 12$  мкм,  $f = 20$  кГц). Полученные данные согласуются с теоретическими данными. Влияние угла ввода колебаний относительно вектора скорости главного движения на параметры шероховатости поверхности подчиняется тем же зависимостям, что и для волнистости. Применение УЗПД по тангенциальной схеме обеспечивает формирование поверхности с высотными и шаговыми параметрами микрогеометрии, соответствующими 5 качеству и выше (в диапазоне номинальных размеров 20 - 50 мм), что говорит о возможности его применения в качестве финишного метода обработки.

Анализ морфологии поверхности позволил установить, что топография поверхности после ультразвуковой обработки обладает специфичным микрогеометрическим состоянием, имеющим ячеистое строение, не характерным для других методов ППД. При этом наблюдается более активное распределений обрабатываемого материала по поверхности, по сравнению с методом АВ (рисунок 6).

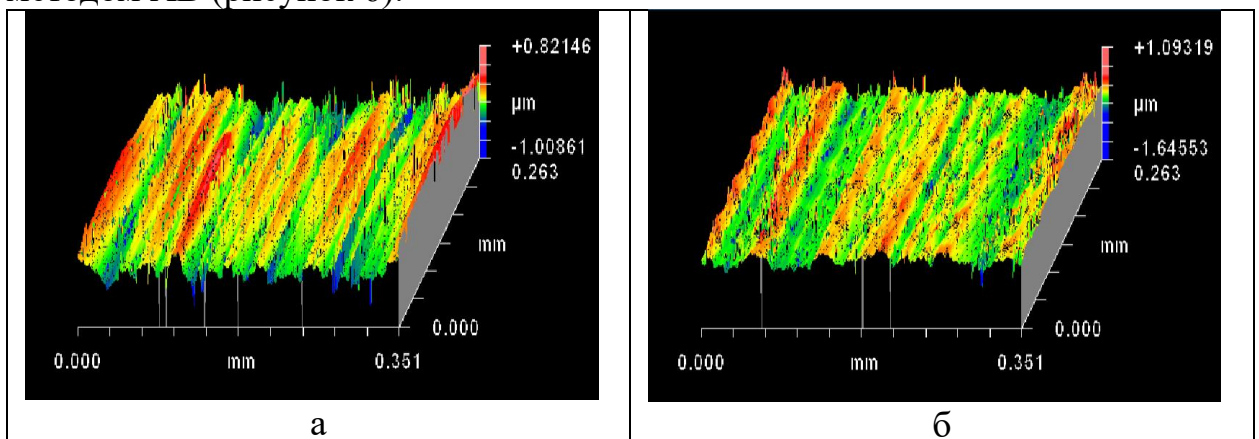


Рисунок 6 – Топография образцов из алюминиевого сплава Д16Т ( $P_{CT} = 60$  Н,  $S = 0,1$  мм/об,  $V_V = 62,83$  м/мин): а – АВ; б – УЗПД по тангенциальной схеме

Влияние УЗПД по тангенциальной схеме на механические и эксплуатационные свойства описаны в **пятой главе**. Установлено, что применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования приводит к повышению микротвёрдости деталей, выполненных из различных металлов и сплавов, и является конкурентоспособным способом ППД по сравнению с методом АВ (для исследуемых материалов пределы прироста микротвёрдости от 40 до 53%).

Также показано, что изменение угла ввода колебаний относительно вектора скорости главного движения сказывается на изменении микротвёрдости обрабатываемой поверхности как по величине, так и по глубине деформирования ( $L$ ) (рисунок 7). При этом наибольшее упрочнение достигается при углах ввода колебаний  $\beta = 60, 90^\circ$ .

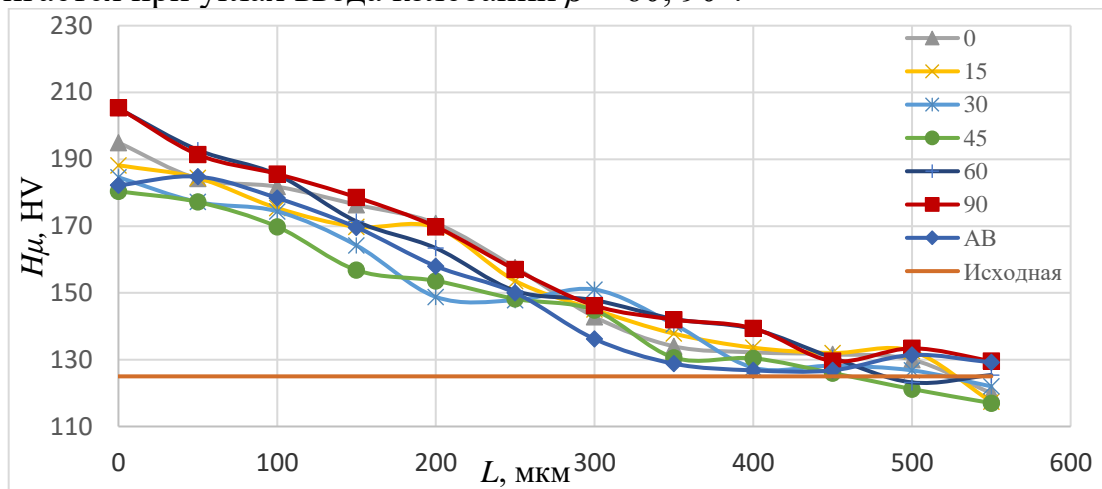


Рисунок 7 – Распределение микротвёрдости по глубине при различных значениях угла  $\beta$

В ходе экспериментальных исследований установлено, что поверхности деталей после УЗПД по тангенциальной схеме характеризуются наличием остаточных напряжений сжатия (в диапазоне  $-75$  до  $-360$  МПа), что косвенно указывает на повышение усталостных свойств, относительно усталостных свойств поверхностей, обработанных шлифованием и АВ (рисунок 8).

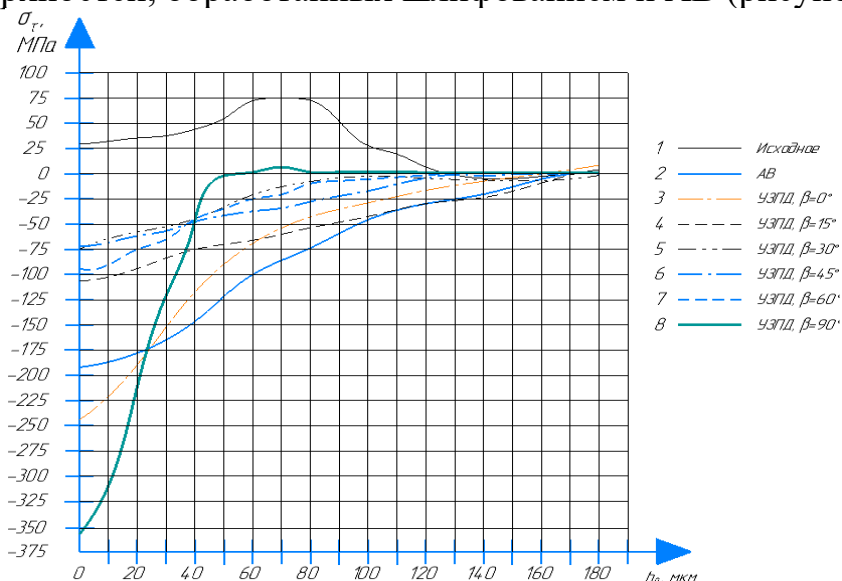


Рисунок 8 – Распределение тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое: 1 – исходное; 2 – АВ; 3-8 – УЗПД по тангенциальной схеме  $\beta = 0, 15, 30, 45, 60, 90^\circ$

В качестве эксплуатационных свойств оценивалась износостойкость и деформационные характеристики поверхностей образцов после УЗПД по тангенциальной схеме, АВ, а также обработанных шлифованием (рисунок 9). Анализ полученных данных показал, что применение УЗПД по тангенциальной схеме приводит к увеличению износостойкости обрабатываемой поверхности. При этом линейный износ у подвергнутых ультразвуковой обработке образцов (при  $\beta = 90^\circ$ ) на 60 и 46% меньше чем у поверхностей после шлифования и АВ соответственно.

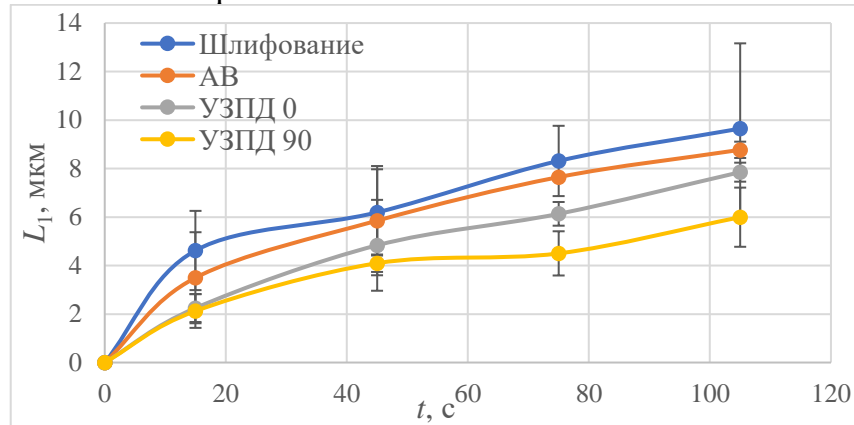


Рисунок 9 – Зависимость линейного износа образцов от времени испытания

Полученные в результате испытаний по оценке деформационных свойств данные позволили установить, что разделение областей упругой и пластической деформации образцов после УЗПД по тангенциальной схеме наступает значительно позже, чем у образцов, обработанных шлифованием и АВ (исследования проводились по программе с увеличивающейся амплитудой напряжений на каждом цикле). Так как повышение упругих свойств материала в большинстве случаев приводит к росту усталостных свойств изделий, то УЗПД по тангенциальной схеме можно рекомендовать в качестве метода повышения усталостной прочности деталей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа является комплексным исследованием ультразвукового поверхностного пластического деформирования по тангенциальной схеме. Решена актуальная научно-техническая задача по обеспечению качества поверхностного слоя деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов, ультразвуковым деформированием. На основании проведённых исследований и полученных данных сформулированы следующие выводы:

1. Установлено, что применение УЗПД по тангенциальной схеме является рациональным для обеспечения качества поверхностного слоя деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов, в связи с возможностью достижения, при однопроходной обработке, различных сочетаний упрочняющего и выглаживающего эффектов.

2. Установлены теоретические закономерности формирования топографии поверхности при УЗПД по тангенциальной схеме, учитывающие



относительное фазовое смещение соседних следов обработки, величину угла  $\beta$  ввода колебаний относительно вектора скорости главного движения, позволившие разработать математическую модель формирования топографии поверхности детали при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании.

3. Экспериментально установлены взаимосвязи параметров шероховатости поверхности с технологическими параметрами УЗПД ( $V_v, P_{ст}, S, \beta$ ) при частоте  $f = 20$  кГц и амплитуде колебаний  $A = 12$  мкм по тангенциальной схеме в виде уравнений регрессии пятого порядка, позволяющие назначать режимы обработки для достижения требуемого микрогеометрического состояния обрабатываемой поверхности в пределах  $Ra$  от 0,1 мкм до 1,74 мкм,  $Sm$  от 60,1 мкм до 168,1 мкм и  $t_p$  от 46,6 до 100 %, и определять границы области допустимых режимов, исключая интенсивное течение обрабатываемого материала и формирование волнистости поверхности, с учётом уровня исходной твёрдости материала детали.

4. Экспериментально установлены взаимосвязи параметров физико-механического состояния (микротвёрдость поверхности, остаточные напряжения) с технологическими параметрами УЗПД ( $V_v, P_{ст}, S, \beta$ ) при частоте  $f = 20$  кГц и амплитуде колебаний  $A = 12$  мкм по тангенциальной схеме в виде графических зависимостей, позволяющие назначать режимы обработки для достижения требуемого состояния обрабатываемой поверхности в пределах прироста микротвёрдости от 40 до 53 %, с формированием в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений в диапазоне -75 до -360 МПа.

5. По результатам исследования износостойкости по схеме "диск-колодка" в паре латунь Л68-сталь 45 установлено, что УЗПД по тангенциальной схеме повышает износостойкость до 60 % по сравнению с износостойкостью поверхности обработанной шлифованием.

6. Оценка упругих и пластических свойств деталей из алюминиевого сплава Д16Т на универсальной сервогидравлической установке *BISS UT-100* в условиях растяжения с изменением по методике от нулевого цикла с увеличивающейся амплитудой напряжений на каждом цикле показала, что УЗПД по тангенциальной схеме увеличивает число циклов нагружения до возникновения пластической деформации в 8 и более раз.

7. Разработан алгоритм управления технологическим процессом УЗПД по тангенциальной схеме и технологические рекомендации по его применению для обработки пластичных металлов и сплавов, учитывающие относительное фазовое смещение соседних следов обработки, величину угла ввода колебаний  $\beta$ , исходные параметры поверхности, геометрии и материала обрабатываемой детали ( $Ra, Rz, R_{max}, R_p, HB, E, \mu, D$ ), позволяющие назначать рациональные параметры обработки для обеспечения требуемого состояния обработанных ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием поверхностей деталей.

8. Результаты диссертационной работы использованы на промышленных предприятиях для обеспечения стабильного микрогеометрического состояния корпусов теплонагруженных СВЧ усилителей мощности (АО "НПО НИИИП-НЗиК"), титановых штоков (АО "Авиаагрегат", г. Самара). Результаты проведенных исследований используются при реализации учебного процесса в Новосибирском государственном техническом университете.

Дальнейшее развитие исследования данной тематики заключается в разработке математической модели, позволяющей моделировать комбинированное микрогеометрическое и физико-механическое состояние поверхностей после применения УЗПД по тангенциальной схеме. Также имеет практический и научный интерес установление рациональных границ применимости данной схемы ультразвукового деформирования, по сравнению с УЗПД по нормальной схеме.

#### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Семенова, Ю. С. Применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования при модификации поверхностного слоя / Ю. С. Семенова, **А. Г. Самуль**, С. В. Мажуга // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. - Т. 16, № 5. - С. 200-204. - DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-5-200-204.

2. Рахимьянов, Х. М. Обеспечение микрогеометрического состояния поверхности деталей, выполненных из пластичных материалов, ультразвуковой обработкой / Х. М. Рахимьянов, В. П. Гилета, **А. Г. Самуль** // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. - Т. 16, № 6. - С. 256-259. - DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-6-256-259.

3. **Самуль, А. Г.** Кинематические характеристики процесса ультразвуковой поверхностной обработки / А. Г. Самуль // iPolytech Journal. - 2022. - Т. 26. - № 1. - С. 24-34. - DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-24-34.

#### Статьи в изданиях, индексируемых базами WoS и Scopus

4. Rakhimyanov, K. M. Ultrasonic surface hardening of low carbon steels and non-ferrous alloys [Electronic resource] / K. M. Rakhimyanov, V. P. Gileta, **A. G. Samul** // MATEC Web of Conferences. - 2019. - Vol. 297 : Innovations in Mechanical Engineering (ISPCIME-2019) . - Art. 05005 (12 p.). - DOI: 10.1051/matecconf/201929705005.

5. Rakhimyanov, K. Kinematics of ultrasonic processing / K. Rakhimyanov, V. Gileta, **A. Samul** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2020. – P. 022054. – DOI 10.1088/1757-899X/971/2/022054.

6. **Samul, A.** Ultrasonic Surface Machining of Aluminium Alloy Parts / A. Samul, V. Gileta, A. Nasonov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 321-330. – DOI 10.4028/p-wj4ahe.

#### Статьи в других научных изданиях

7. **Самуль, А. Г.** Ультразвуковая обработка металлов низкой твердости / А. Г. Самуль, В. П. Гилета // Интеллектуальный потенциал Сибири. МНСК–2017 : сб. науч. тр. 25 межвуз. (регион.) науч. студ. конф., Новосибирск, 24–25 мая

2017 года: в 23 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 12. Перспективные инновационные технологии и материалы. – С. 82-86. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3256-3 (ч. 12).

8. **Самуль, А. Г.** Ультразвуковая обработка материалов низкой твердости / А. Г. Самуль, В. П. Гилета // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 27-31.

9. **Самуль, А. Г.** Моделирование процесса формирования микрогеометрии при ультразвуковой обработке / А. Г. Самуль // Наука и инновации XXI века: Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых, Сургут, 30 ноября 2017 года. – Сургут: Сургутский государственный университет, 2017. – С. 95-98.

10. **Самуль, А. Г.** Анализ траектории движения инструмента при ультразвуковом упрочнении с введением колебаний по касательной к поверхности / А. Г. Самуль, Р. М. Кадырбаев, А. С. Юсупов // Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении: сборник трудов III Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Кемерово, 29–30 ноября 2017 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 104.

11. **Samul, A.** Ultrasonic processing of low hardness materials / A. Samul // Science. Research. Practice: Сборник трудов городской научно-практической конференции аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 15 декабря 2017 года / Ответственный редактор А.Ю. Алябьева. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – Р. 145-147.

12. Рахимьянов, Х. М. Ультразвуковая обработка при тангенциальных колебаниях индентора / Х. М. Рахимьянов, В. П. Гилета, **А. Г. Самуль** // Инновации в машиностроении: Сборник трудов X Международной научно-практической конференция, Кемерово, 26–29 ноября 2019 года / Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 73-78.

13. **Samul, A.** Ultrasonic hardening with tangential vibration input / A. Samul // Progress through Innovations : Proceedings VIII International Academic and Research Conference of Graduate and Postgraduate Students: труды международной научно-практической конференции аспирантов и магистрантов, Novosibirsk, 28 марта 2019 года / Ответственный редактор А.Ю. Алябьева. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2019. – Р. 225-227.

14. **Samul, A.** The analysis of the tool motion trajectory at different angles of ultrasonic vibrations input in the processing zone / A. Samul // Science. Research. Practice : Proceedings 2018 Ind All Russia Academic and Research Conference of Graduate and Postgraduate Students / Труды международной научно-практической конференции аспирантов и магистрантов, Novosibirsk, 20 декабря 2018 года / Ответственный редактор А.Ю. Алябьева. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2019. – Р. 257-259.

15. **Самуль, А.Г.** Выбор рациональной схемы ультразвуковой обработки для конструкционных материалов средней твердости / А. Г. Самуль, Х. М. Рахимьянов, В. П. Гилета, Ю. С. Кудрявцева // Инновации в машиностроении : материалы 11 междунар. науч.-практ. конф., Бийск, 22-23 окт. 2020 г. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2020. – С. 111–116. - ISBN 978-5-9257-0328-1.

16. **Самуль, А.Г.** Микрогеометрия деталей из алюминиевых сплавов после ультразвукового поверхностно-пластического деформирования / А. Г. Самуль, А. И. Насонов, В. П. Гилета // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. – № 3(74). – С. 82-90.

17. **Самуль, А.Г.** Влияние угла ввода колебаний на морфологию поверхности при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании / А. Г. Самуль, А. И. Насонов, В. П. Гилета // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Иркутск, 21–23 октября 2021 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – С. 110-116.

18. **Самуль, А. Г.** Влияние ультразвукового поверхностного пластического деформирования на микроструктуру и дюрOMETрические свойства армко-железа / А. Г. Самуль, А. А. Потапов // Наука. Технологии. Инновации : XV Всероссийская научная конференция молодых ученых, посвященная Году науки и технологий в России. Сборник научных трудов в 10-ти частях, Новосибирск, 06–10 декабря 2021 года / Под редакцией Д.О. Соколовой. – НОВОСИБИРСК: Новосибирский государственный технический университет, 2021. – С. 338-342.

19. Болтоков, Д. О. Сравнительный анализ методов поверхностного пластического деформирования: алмазное выглаживание и ультразвуковое пластическое деформирование / Д. О. Болтоков, **А. Г. Самуль**, В. П. Гилета // Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса России: история, реальность, инновации : Сборник статей по материалам VIII Всероссийской научно-практической конференции, Арзамас, 12–13 апреля 2022 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2022. – С. 125-128.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.307.01  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический  
университет»

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс: (383)346-08-57  
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № Р-02425 подписано в печать 21.09.2023 г.