ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Самуль Артём Геннадьевич

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Специальность: 2.5.6 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук,

профессор Рахимянов Харис Магсуманович

кандидат технических наук,

доцент Гилета Виктор Павлович

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ9
ГЛАВА 1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ17
1.1 Качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей
машин
1.2 Методы ППД и их влияние на микрогеометрическое и физико-
механическое состояние поверхности
1.2.1 Разновидности методов ППД
1.2.2 Влияние методов ППД на микрогеометрическое и физико-механическое
состояние поверхности
1.3 Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование 36
1.3.1 Влияние ультразвуковых колебаний на процесс пластического
деформирования
1.3.2 Схемы ультразвуковой обработки поверхностей
1.4 Цель и задачи исследования
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СХЕМ УЗПД
НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТНОСТИ49
2.1 Кинематические особенности различных схем ультразвукового
поверхностного пластического деформирования
2.2 Расположение следов обработки после УЗПД по тангенциальной схеме.
61
2.3 Параметры очага деформирования
2.4 Модель формирования топографии поверхности после УЗПД по
тангенциальной схеме
Выводы по 2 главе
ГЛАВА 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ91

3.1	Технологическое обеспечение ультразвуковой обработки9	1
3.2	Выбор обрабатываемых материалов и формы образцов 9	9
3.3	Методика проведения экспериментов	3
Выв	оды по 3 главе11	3
ГЛА	ВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИ.	Я
ПОВ	ВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ УЗПД11	4
4.1	Отклонения размеров и формы	4
4.2	Волнистость поверхности	7
4.3	Шероховатость поверхности	2
4.4	Морфология поверхности после ультразвукового поверхностног	O'
плас	тического деформирования14	3
4.5	Микроструктура поверхностного слоя	9
Выв	оды по 4 главе16	1
ГЛА	ВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УЗП,	Д
ПО	ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СХЕМЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ	И
ЭКС	ПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА16	3
5.1	Твёрдость и микротвёрдость	3
5.2	Остаточное напряжённое состояние поверхностного слоя посл	(e
ульт	развукового упрочняюще-чистового деформирования17	0
5.3	Износостойкость поверхности	1
5.4	Определение деформационных характеристик поверхностей посл	[e
ульт	развукового поверхностного пластического деформирования	5
5.5	Рекомендации по применению УЗПД по тангенциальной схеме пр	И
обра	ботке деталей из пластичных металлов и сплавов17	7
5.6	Реализация УЗПД по тангенциальной схеме	3
Выв	оды по 5 главе	7
	ЛЮЧЕНИЕ	
СПИ	ІСОК ЛИТЕРАТУРЫ19	1

ПРИЛОЖЕНИЕ А І	П.1. Статисті	ическая обрабо	тка результатов	исследования.
	•••••			204
ПРИЛОЖЕНИЕ	Б П.2.	Обработка	результатов	исследования
микрогеометрическ	их параметр	ов поверхності	и	206
приложение в і	П.3. Обработ	ка результатов	в исследования м	микротвёрдости
поверхности				211
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	Акт внедрени	я результатов	диссертационно	ой работы 214
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	Акт внедрени	ия результатов	диссертационно	ой работы 215
ПРИЛОЖЕНИЕ Е А	Акт использо	вания результа	атов диссертаци	онной работы в
учебном процессе	•••••		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	216

Список условных обозначений

 $\overline{V_{\scriptscriptstyle K}}$ – вектор колебательной скорости инструмента;

 $\overline{V_{\scriptscriptstyle V}}$ – вектор скорости главного движения;

 $\overline{V_{\scriptscriptstyle S}}$ – вектор скорости подачи;

A — амплитуда колебаний, мкм;

 A_0 – колебательное смещение инструмента, м;

 $Ar_{\rm Д}$ – фактическая площадь контакта при скольжении, мм²;

 $A_{\Pi P}$ – площадь фактического касания детали и деформатора, мм²;

b и v – константы, зависящие от вида обработки;

 b_1 – ширина следа обработки, мм;

c – скорость распространения продольных волн в материале, м/с;

D – диаметр обрабатываемой детали, мм;

d – диаметр отпечатка деформатора на поверхности детали, мм;

 D_1 – диаметр рабочего инструмента, мм;

 d_2 — среднеарифметическое из длин двух диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм;

 d_3 – средний диаметр зерна, нм;

F — площадь зоны контакта, мм 2 ;

f – частота колебаний, Γ ц;

 f_{TP} – коэффициент трения;

 $F_{\rm УП}$ – площадь упругого восстановления, мм²;

h — глубина наклёпа, мм;

НВ – твёрдость материала по Бринеллю;

HV – микротвёрдость материала по Виккерсу;

 h_{O} – глубина залегания остаточных напряжений, мкм;

 $H\mu_{\text{ucx}}$ – микротвёрдость исходной поверхности;

 $H\mu_{\text{пов}}$ – поверхностная микротвёрдость;

 h_{∂} – полная глубина внедрения (при динамике), мм;

 $h_{\text{ост}}$ – остаточная глубина дорожки трения (при динамике), мм;

```
j – ускорение, м/c^2;
```

K — ширина коридора следа обработки, мм;

 K_{HB} – коэффициент пропорциональности;

 K_S , K_h — коэффициенты, учитывающие влияние ультразвуковых колебаний на параметры отпечатка;

L – длина волновода, мм;

l — путь по средней линии проходимый деформатором за 1 период колебаний, мм;

 $l_{\rm m}$ – длина, равная проекции синусоиды, пройденной за $(1-m)\cdot l$;

 L_1 – величина линейного износа, мкм;

 L_X – проекция перемещения инструмента на ось OX;

 L_Y – проекция перемещения инструмента на ось OY;

 L_Z – проекция перемещения инструмента на ось OZ;

m — дробная часть времени одного оборота к периоду колебаний;

M – целая часть времени одного оборота к периоду колебаний;

N — степень перекрытия следов обработки, мм $^{-2}$;

n – число оборотов детали в минуту, мин⁻¹;

 N_i – номер оборота детали;

 $N_{\rm Y}$ – коэффициент усиления;

Р – постоянное значение прилагаемой нагрузки, Н;

 P_{max} – максимальное значение прилагаемой нагрузки, H;

 P_{min} — минимальное значение прилагаемой нагрузки, H;

 $P_{
m KPUT}$ — статическое усилие, при котором наблюдается начало формирования волнистости поверхности, H;

 $P_{\rm CT}$ – статическое усилие, H;

 $P_{\rm CTrpah}$ — статическое усилие, при котором наблюдается максимальный прирост микротвёрдости, H;

 $P_{\rm TP}'$ – макроскопическая сила трения, H;

R – высота неровности, мкм;

 r_1 – радиус деформатора, мм;

Ra — среднеарифметическое отклонение профиля, мкм;

Rmax – общая высота профиля, мкм;

 R_P – максимальная высота выступа профиля, мкм;

 R_{sk} – параметр асимметричности профиля;

 Rw_{cp} – средний радиус выступов волн, мкм;

Rz — максимальная высота профиля, мкм;

 $r_{\rm B}$ – радиус закругления вершин выступов;

 $r_{\rm BH}$ — радиус закругления впадин;

 R_H – радиус лунки отпечатка деформатора, мм;

 $r_{\text{ОТП}}$ – ширина дорожки движения инструмента, мм;

 $r_{\rm УП}$ — длина восстановленного участка, мм;

S – подача инструмента, мм/об;

Sm — шаг неровности по средней линии, мкм;

 Sm_{w} – средний шаг волн, мкм;

 $S_{\rm H}$ – шаг неровности, мм;

T – период колебаний, с;

t – время, с;

 t_P – относительная опорная длина профиля, %;

 T_P – относительная опорная площадь, %;

 t_{CT} – глубина абсолютного вдавливания, мм;

 V_K – колебательная скорость инструмента, м/мин;

 V_S – скорость подачи инструмента, м/мин;

 V_V – скорость главного движения, м/мин;

w – глубина восстановления отпечатка, мм;

Wa – среднее арифметическое отклонение профиля волн, мкм;

 Wp — максимальная высота выступа волнистости, мкм;

Wsm - шаг волнистости по средней линии, мкм;

Wz – средняя высота волн, мкм;

X – ось, совпадающая с направлением главного движения;

Y – ось, совпадающая с радиальным направлением;

Z – ось, совпадающая с направлением подачи;

 β — угол ввода колебаний инструмента относительно вектора главной скорости, °;

 β_1 – угол направления расположения элемента, °;

 Δl — деформация образца, %

 $\delta_{\Pi \Pi \Pi}$ — угол наклона зерна относительно направления главной скорости в поперечном сечении, °;

 $\delta_{\Pi P}$ — угол наклона зерна относительно направления главной скорости в продольном сечении, °;

 $\delta_{\rm P}$ — результирующий угол наклона зерна относительно направления главной скорости, °;

 ε — величина отношения расстояния от вершины самой высокой неровности до рассматриваемого сечения к высоте самой высокой неровности;

 $\varepsilon_{\rm II}$ – степень деформации, %;

 μ_1 , μ_2 , E_1 , E_2 — коэффициенты Пуассона и Юнга материалов детали и деформатора;

 σ_{τ} – остаточные напряжения, МПа;

 ϕ – угол взаимного расположения характерных точек соседних траекторий, °;

 ω – круговая скорость, рад/с;

АВ – алмазное выглаживание;

КПД – коэффициент полезного действия;

○ – отклонение от круглости, мкм;

ППД – поверхностное пластическое деформирование;

ПС – поверхностный слой;

СВЧ – сверхвысокой частоты;

СПИД - станок-приспособление-инструмент-деталь;

УЗ – ультразвуковой;

УЗПД – ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование;

 $У\Pi$ – усталостная прочность.

ВВЕДЕНИЕ

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 усилителей сверхвысокой теплонагруженных мощности 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 требуемыми микрогеометрическими и физико-механическими параметрами, отличными от основного материала детали. Придание рациональных свойств, с точки зрения эксплуатационных условий, поверхностному слою позволяет повысить надёжность и долговечность изделия [42, 93, 103].

Итоговое состояние поверхностного слоя. именно его физико-механические параметры, микрогеометрические и чаще всего 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 [60]. 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, основанные на поверхностном пластическом деформировании (ППД) [34, 74, 93, 103]. 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, наличием остаточных напряжений сжатия, при одновременном достижении низких микрогеометрических параметров поверхности. Данные методы обладают высокой производительностью и низкой себестоимостью и позволяют управлять итоговым состоянием поверхности. 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 cультразвуковой частотой (УЗПД). Применение данного метода позволяет интенсифицировать пластическое течение материала поверхностного слоя, при обеспечении выглаживающего и упрочняющего эффекта широкой номенклатуры деталей, различных выполненных ИЗ материалов. Использование малого статического нагружения при УЗПД позволяет обрабатывать нежесткие, тонкостенные детали. Наличие большого количества технологических параметров позволяет управлять 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 НВ150). Поскольку эти материалы широко распространены в важных для народного хозяйства областях, а их характеристики 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 технологических возможностей процесса 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 физикомеханического 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_{CT} , частота f и амплитуда A ультразвуковых колебаний, радиус рабочего инструмента r_1 , угол β 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 направлению 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 анализа УЗПД по тангенциальной схеме особенности движения рабочего инструмента

относительно обрабатываемой поверхности и характера действующих сил в зоне деформирования УЗПД по тангенциальной схеме.

- 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, выполненных из пластичных металлов и сплавов.
- 4. Аналитические и эмпирические зависимости влияния технологических параметров УЗПД на геометрические параметры поверхности.
- 5. Результаты оценки влияния угла β 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 физикомеханического 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, установы, позиции, технологические переходы и рабочие хода, 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 диссертационной работы положения И результаты 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 функциональные покрытия в машиностроении" (г. Кемерово, 2017 г.), Х Международной научно-практической конференции "Инновации машиностроении" (Γ. Кемерово, 2020 г.), международной 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 научнотехнической 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 пяти глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 110 наименований. Работа содержит 216 страниц текста, в том числе 127 рисунков и 14 таблиц.

Диссертация выполнялась при поддержке: гранта РФФИ № 20-31-90059, "Обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин, выполненных из цветных металлов и сплавов, ультразвуковым пластическим деформированием".

ГЛАВА 1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

1.1 Качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей машин

Поверхностным слоем (ПС) принято называть наружный слой детали, и примыкающий к ней слой материала [103]. Эксплуатация машин и механизмов сопровождается контактированием ПС деталей друг с другом и/или с рабочей средой. Это обуславливает наиболее сильное механическое, химическое, коррозионное, тепловое и другие воздействия на поверхностный слой. Влияние этих факторов будет приводить к ухудшению эксплуатационных свойств и разрушению ПС. Поэтому к качеству поверхностного слоя в большинстве случаев предъявляются требования, значительно отличающиеся, от свойств основного материала изделия.

Состояние ПС формируется на финишных этапах обработки и определяется как способом технологического воздействия, так и материалом изделия. Характеризуют поверхностный слой по геометрическому и физикомеханическому состоянию.

Реальный профиль деталей характеризуется наличием И микроотклонений от заданной формы. Их наличие обусловлено погрешностью ИΧ обработки. Данные отклонения методов оказывают эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений. В зависимости от отношения шага $S_{\rm H}$ к высоте неровностей R геометрические отклонения подразделяют на: макрогеометрические или отклонения формы, при $S_{\rm H}$ /R > 1000; волнистость поверхности, при $S_{\rm H}$ /R = 50...1000; шероховатость поверхности, при $S_{\rm H}$ /R < 50. Кроме этих характеристик могут наблюдаться , инкаси являюшиеся элементами, неровностями поверхности непреднамеренно или случайно образованными во время производства, хранения или эксплуатации деталей [35, 74, 102, 103].

Согласно ГОСТ 2789-73 под шероховатостью поверхности понимается совокупность неровностей профиля высотой $10^2 - 10^3$ мкм с шагом, меньшим его базовой длины [28, 31]. Она характеризуется как высотными (Ra, Rz, Rmax), так и шаговыми (Sm, S_H) параметрами.

Общая совокупность неровностей по всей поверхности макроотклонением. В зависимости otразмеров деталей величина макроотклонений десятых долей варьируется OT микрометра ДО миллиметровых значений.

Отклонение поверхности, величина которого находится между шероховатостью и макроотклонением является волнистостью. Формирование этого параметра чаще всего связано с вибрациями системы СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь), а иногда и с чрезмерным усилием, имеющим место при обработке.

Нормирование волнистости (ГОСТ Р ИСО 4287-2014) в нашей стране относительно недавно [31]. Регламентируются началось следующие параметры: Wa – среднее арифметическое отклонение профиля волн; Wz – средняя высота волн, Rw_{cp} — средний радиус выступов волн; Sm_w — средний шаг волн. В зависимости от направления волнистость подразделяется на продольную (расположение волн по направлению перемещения инструмента) поперечную (расположение волн перпендикулярно перемещению инструмента).

В процессе изготовления, под действием различных факторов (силовых, температурных и др.), происходит изменение физических свойств ПС обрабатываемых изделий. Атомы, находящиеся у поверхности детали, обладают нестабильным состоянием, поскольку имеют односторонние связи. Следствием этого является повышение химической активности, ведущей к адсорбции элементов контактируемой среды.

Эти особенности приводят к изменению физико-механического состояния поверхностного слоя, характеризуемого остаточными напряжениями, твёрдостью, структурно фазовым составом и др.

Остаточными считают сформировавшиеся и уравновешенные напряжения внутри твёрдого тела. Они характеризуются знаком остаточных напряжений ($\pm \sigma_{\tau}$), глубиной залегания h_O и законом распределения.

Согласно классификации Н.И. Давиденкова [33] по протяжённости силового поля различают следующие остаточные напряжения:

Напряжения I рода — макронапряжения, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали. Они возникают в металле в процессе деформации больших объемов в результате взаимодействия структурных составляющих между собой.

Напряжения II рода — микронапряжения — распространяются на отдельные зерна металла или на группу зерен. Возникают как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации.

Напряжения III рода относятся к искажениям атомной решетки кристалла.

Образование макронапряжений происходит при производстве деталей, в следствие неоднородности пластической деформации и различной степени нагрева материала ПС.

Основными причинами возникновения микронапряжений являются наличие дислокаций, дислокационных стенок (блоки и ячейки), дефектов упаковки, которые формируются в ходе фазовых превращений, температурных изменений, анизотропии механических свойств отдельных зёрен и их границ.

Напряжения третьего рода обусловлены дислокациями и внедрением атомов.

Эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени зависят от геометрического и физико-механического состояния

поверхностного слоя. К ним можно отнести износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность, отражаемость и др.

Износостойкость является одним из важнейших свойств деталей машин и определяет способность поверхностных слоев деталей сопротивляться при трении-скольжении, трении-качении, разрушению также микроперемещениях, обусловленных воздействием вибраций. Процесс всегда сопровождается износом рабочих поверхностей, эксплуатации приводящему к потере точности, повышению динамических нагрузок, вследствие увеличения зазоров сопряжений, повышению шума, снижению КПД. Износ является самой частой причиной выхода машин и механизмов из строя (до 80 %) [87, 93]. В процессе приработки контактирование сопрягаемых поверхностей происходит по вершинам неровностей. Период начальной работы изделий характеризуется наличием больших контактных давлений и деформаций, превосходящих расчётные значения. В местах контакта происходит упругое сжатие и пластическое смятие неровностей. Взаимное перемещение поверхностей приводит к срезу, отламыванию, пластическому сдвигу вершин неровностей, приводящих к интенсивному начальному износу. Эти особенности процесса приработки приводят к постепенному уменьшению шероховатости, волнистости и макроотклонений до тех пор, пока не сформируется характерная для данных условий трения шероховатость, названная равновесной. Достижение оптимальной геометрии контактируемых поверхностей сопровождается уменьшением интенсивности изнашивания. Поэтому для уменьшения начального износа целесообразно создавать поверхности, шероховатость которых является равновесной [52].

Износостойкость поверхности определяется не только высотными параметрами шероховатости (Ra, Rz, Rmax). Важную роль в этом процессе играют величина и закон высотного изменения опорной площади сопрягаемых поверхностей, радиусы кривизны выступов профиля $r_{\rm B}$, шаг неровности профиля по вершинам $S_{\rm H}$ и по средней линии Sm. В зависимости от метода

обработки, при одинаковых высотных значениях шероховатости, опорная площадь и другие параметры могут отличаться в 2-3 и более раз [93]. Волнистость и макроотклонения поверхности уменьшают фактическую площадь контакта, оцениваемую относительной опорной длиной профиля t_P и относительной опорной площадью T_P , приводящим к значительным деформациям и перемещениям в соединениях [35].

Авторами [92, 93] установлено, что цилиндрические образцы из стали 30XГСА, обработанные методами накатывания, шлифования, притирки, электромеханической обработки, с различной шероховатостью (Ra = 0,13...0,77 мкм) работая в паре с контртелами из чугуна СЧ18 (Ra = 0,16...0,25 мкм) показали различные результаты при испытаниях на износостойкость. При испытаниях оценивалось изменение параметров шероховатости (Ra, Rmax), максимальной высоты волнистости и поверхностной микротвёрдости $H\mu_{\Pi OB}$. Определено, что наибольшее влияние на износ оказывает варьирование значениями приведённого радиуса выступов (32%) и параметра Ra (17%).

Расположение неровностей, относительно направления скольжения, также оказывает влияние на износостойкость контактируемых поверхностей. Наибольший износ наблюдается при расположении неровностей перпендикулярно движению сопряжённых деталей [15, 36, 40]. По мере достижения сонаправленности расположения неровностей износ уменьшается, при этом его минимальное значение наблюдается при совпадении направления неровностей деталей с направлением скольжения.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о том, что для различных условий эксплуатации необходимо обеспечить определённое геометрическое состояние поверхностного слоя. В зависимости от требуемого комплекса геометрических параметров следует назначать методы и режимы обработки, позволяющие достичь ЭТОГО состояния. Формирование несущей способностью достаточной шероховатости \mathbf{c} высокой И маслоёмкостью обеспечивает износостойкость поверхности.

Существенное влияние на износостойкость оказывает уровень твёрдости поверхностного слоя [9]. Согласно данным [53, 74, 103], прирост твёрдости поверхности приводит к уменьшению износа, вследствие лучшего сопротивления истиранию в процессе эксплуатации. Однако, при явлении перенаклёпа возможно ухудшение износостойкости поверхности [60].

Согласно авторам [42, 56, 64, 71, 77, 101] знак, величина и глубина залегания остаточных напряжений оказывают существенное влияние на усталостную прочность [45]. Согласно данным [58] повышение выносливости гладких образцов из стали 40 примерно на 1/3 происходит из-за благоприятного воздействия остаточных напряжений. Наличие сжимающих остаточных напряжений благоприятно сказывается на этих показателях [55, 81], в то время как растягивающие приводят к снижению усталостной прочности [103]. В большинстве случаев наклёп обеспечивает формирование остаточных сжимающих напряжений, что благоприятно влияет на усталостные свойства материалов [15, 64].

Исследование влияния знака остаточных напряжений, описанное в работе [57], показало, что при сжимающих остаточных напряжениях предел выносливости конструкционных металлов повышается до 50%, а при растягивающих наблюдается его уменьшение до 30%. Согласно данным [58] повышение усталостной прочности при изгибе гладких образцов из стали 40 возможно счёт остаточных напряжений сжатия. Подтверждение благоприятного влияния остаточных напряжений сжатия на усталостную прочность изделий можно найти в работах [51, 80]. При наибольшей глубине залегания остаточных напряжений, в процессе алмазного выглаживания с диапазоном нагрузок 0...400 Н, было обнаружено, что поверхность с наибольшей глубиной залегания остаточных напряжений имеет наибольшее значение предела выносливости [92].

Свойства поверхностного слоя после деформационного упрочнения определяются свойствами основного материала: после обработки чаще всего

наблюдается увеличение предела пропорциональности и текучести и снижение пластических свойств. Так у пластических материалов, имеющих сравнительно большую разницу пределов текучести прочности, поверхностный слой может выдерживать большие деформации без повреждения, и наоборот, что говорит о различной степени чувствительности различных по свойствам металлов и сплавов к пластической деформации поверхностного слоя. Повышение механических свойств деформационным упрочнением повышает сопротивление усталости до момента исчерпания пластических свойств, после которого наблюдается его снижение [15]. Это обуславливает способность пластичных материалов к большему приросту сопротивления усталости, чем у малопластичных [15].

Степень влияния остаточных напряжений на усталостную прочность может быть, как значительной, так и нет. Это зависит от условий циклического нагружения и температуры. При приближении температуры к точке рекристаллизации происходит релаксация остаточных напряжений. Поэтому, при эксплуатации поверхности в области этих температур влиянием остаточных напряжений можно пренебречь [5].

В работе [103] оценено влияние шероховатости стали 30ХГСА на усталостную прочность (УП): уменьшение Ra с 0,74 мкм до 0,22 мкм приводит к увеличению УП на 14%, а срок службы деталей увеличился в 3 раза.

Существенное влияние на усталостную прочность оказывает геометрическое состояние поверхности. Поэтому при изготовлении деталей следует применять методы обработки, обеспечивающие наименьшую шероховатость и наибольший радиус скругления впадин микронеровностей, например, методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Использование ППД позволяет получать большие радиусы скругления микронеровностей (600-3000 мкм) [32, 75].

Применение деформационного упрочнения приводит к изменению напряжённого состояния и в зависимости от механических свойств

обрабатываемого материала будет по-разному сказываться на сопротивлении усталости. Так для пластичных металлов оно в большей степени зависит от прироста микротвёрдости, а для малопластичных от напряжённого состояния ПС [15].

Коррозионная стойкость деталей также зависит от качества ПС, поскольку разрушение начинается с поверхности изделия. Процесс коррозии химического и/или является следствием электромеханического взаимодействия поверхности с рабочей средой, при котором происходит её разрушение [107, 113]. На коррозионную стойкость влияет как морфология eë поверхности, физико-механическое состояние. Влияние так И микрогеометрии можно объяснить тем, что во впадинах микронеровностей концентрируются химически активные частицы, за счёт наложения электрических полей боковых граней и дна профиля шероховатости. При этом установлено, что уменьшение коррозионной стойкости наблюдается при росте Ra, Rz, Rmax, а увеличение при возрастании t_P и Sm, а общее влияние геометрии на коррозионную стойкость равно 12% [103].

Согласно авторам [37, 43, 72] деформационное упрочнение оказывает существенное влияние на коррозионные характеристики поверхности. Зависимость коррозионной стойкости от степени упрочнения носит экстремальный характер [82]. При этом наибольшее влияние играет неравномерность упрочнения, способствующая возникновению разницы потенциалов между различно деформированными объёмами, что ведёт к образованию гальванических пар, отрицательно сказывающихся на коррозионной стойкости [82]. Наряду с этим отмечается положительное влияние остаточных напряжений сжатия на коррозионную стойкость [82].

Анализ литературных данных указывает на то, что эксплуатационные свойства ПС деталей машин зависят от совокупности физико-механических и геометрических параметров. Обеспечение требуемого состояния поверхностного слоя реализуется методами и условиями обработки. В работе

[103] установлена взаимосвязь параметров качества ПС и эксплуатационных свойств (таблица 1). Использование полученных закономерностей позволяет формировать комплекс требуемых физико-механических и геометрических параметров поверхностного слоя, обеспечивающих высокую работоспособность деталей для конкретных условий эксплуатации.

Изготовление деталей перспективными методами обработки позволяет вскрыть дополнительные резервы повышения эксплуатационных свойств технологическими методами, одним из которых является поверхностное пластическое деформирование.

Таблица 1 – Влияние геометрических параметров на эксплуатационные свойства деталей машин

		Геометрические характеристики поверхности														Физико-механические характеристики					
Эксплуатационные	Шероховатость									Волнистость			Макроотк- лонения		Поверхностная микротвёрдость		Поверхностные остаточные напряжения				
свойства	R_a	R_z	R_{max}	S_m	S	t_p	(R_p)	tR_p	(<i>d</i>)	(6)	Направл. неровн.	W_a	W_{max}	W_p	Sm_{w}	H_{max}	H_p	$H\mu_{nos}$	h_{μ}	σ_{nos}	h_{σ}
Износостойкость																					
сухое трение	(+)	(+)	(+)	(+)	-	+	+	(+)	+	-	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	+	+	+	+
жидкое трение	+	(+)	(+)	+	(+)	+	+	(+)	+	(+)	+	+	+	+	+	(+)	+	+	(+)	+	(+)
граничное трение	+	(+)	(+)	+	(+)	+	+	(+)	+	(+)	+	+	(+)	+	(+)	+	-	-	-	-	-
избирательный перенос	(+)	(+)	(+)	(+)	-	(+)	+	(+)	+	(+)	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	+	-	+	-
Усталостная прочность	(+)	(+)	+	(+)	-	-	+	-	-	+	+	-	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	+	+
Контактная жёсткость	(+)	(+)	(+)	(+)	-	+	+	+	+	-	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	+	-	(+)	-
Виброустойчивость	(+)	(+)	(+)	+	-	+	+	+	+	-	+	(+)	-	+	(+)	(+)	+	+	(+)	(+)	(+)
Коррозионная стойкость	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	(+)	(+)	-	(+)	-	+	(+)	(+)	(+)	-	(+)	+	+	+	+
Прочность сопряжений	(+)	(+)	-	(+)	-	+	+	(+)	+	-	+	(+)	-	+	(+)	(+)	+	+	-	(+)	-
Плотность соединений	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	(+)	-	-	+	+	(+)	+	(+)	(+)	+	-	-	-	-
Прочность сцепления покрытий	(+)	+	(+)	+	-	(+)	+	(+)	(+)	(+)	+	(+)	(+)	(+)	(+)	-	-	+	(+)	+	(+)
Обтекаемость газами и жидкостями	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	+	(+)	(+)	+	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	-	-	-	-
Теплоотражение	+	(+)	(+)	+	+	(+)	+	(+)	(+)	(+)	+	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	+	(+)	+	(+)

⁺ - характеристики, оказывающие основное влияние на данное эксплуатационное свойство; (+) - характеристики оказывающие ограниченное влияние на данное эксплуатационное свойство; - - отсутствие влияния; R_p , t_{Rp} , ρ и ρ' - параметры, не вошедшие в ГОСТ 2789-73 (шероховатость поверхности)

1.2 Методы ППД и их влияние на микрогеометрическое и физикомеханическое состояние поверхности

Развитие авио-, машино- и приборостроения связано с ужесточением условий эксплуатации машин и механизмов, что выражается в необходимости повышения их точности и надёжности. В связи с этим в промышленных странах наблюдается постоянный интерес как к совершенствованию, так и поиску новых чистовых методов обработки [46, 47, 111]. Применение различных способов ППД в качестве завершающих операций производства имеет преимущества, относительно обработки резанием, в формировании рабочих поверхностей деталей с высокими эксплуатационными показателями.

Методы ППД успешно заменяют такие финишные методы, как [79, 801. хонингование, доводка, суперфиниширование Главным преимуществом поверхностного пластического деформирования является одновременная обработка поверхности детали и упрочнение её ПС (что редко достигается при чистовой обработке резанием). Данные особенности обуславливают эксплуатационные свойства изделий высокие (износостойкость, контактная выносливость, предел усталости), и повышение их надёжности. Применение ППД при обработке пластичных материалов (алюминиевые сплавы, медь и т.д.) не приводит к шаржированию поверхности, имеющему место при абразивной обработке. Совокупность особенностей, простоты отличительных реализации, высокой экономической эффективности обуславливают развитие и внедрение чистовой обработки металлов давлением.

1.2.1 Разновидности методов ППД

Существует множество методов ППД, которые подразделяют на статические и ударные [24]. Для статических методов характерно воздействие деформирующего инструмента с постоянным значением прилагаемой нагрузки P, обеспечивающее плавное перемещения очагов деформирования по обрабатываемой поверхности [74]. Наличие многократного воздействия

инструмента на обрабатываемую деталь, при переменном значении прилагаемой нагрузки от значения P_{min} до P_{max} является основой ударных методов ППД. При наличии ударного локального воздействия, также, как и для статических способов поверхностного пластического деформирования, при равномерном перемещении очага деформации возможна полная обработка поверхности.

Наибольшее распространение в промышленности получили статические методы ППД. Это обусловлено относительной простотой реализации и стабильностью протекания процесса обработки. Статические методы по характеру трения между поверхностью и деформирующим инструментом можно разделить на способы, использующие трение скольжения и трение качения.

Способы, основанные на трении скольжения – алмазное выглаживание (АВ), дорнование, вибровыглаживание и др. [23, 48].

Процесс АВ осуществляется за счёт пластического деформирования деталей алмазным деформатором, закреплённым в жёсткой или нежёсткой державке [98, 111]. Существует несколько форм деформаторов – полусфера, цилиндр или конус с скруглением рабочей части. Наиболее широкое применение получил инструмент, выполненный в виде полусферы. Кинематика АВ аналогична точению, что позволяет реализовывать обработку цилиндрических деталей на токарных станках, без дополнительной оснастки. Достоинства АВ обусловлены физико-механическими свойствами алмазных деформаторов – высокие твёрдость, теплопроводность и низкий коэффициент трения. Этим обосновывается популярность и широкое применение данного метода в процессах машиностроения [41].

Применение AB позволяет обрабатывать детали, выполненные практически из любых промышленных металлов и сплавов, кроме титана, циркония и ниобия, так как они налипают на деформатор. Процесс

выглаживания применим при обработке различных по твёрдости материалов – от мягких металлов до закалённых сталей [84].

В виду того, что в процессе обработки алмаз практически не деформируется, а радиус рабочей части инструмента весьма мал (0,5-3,5 мм) область контактирования деформатора с деталью незначительна [106]. Этим обуславливается создание высоких контактных давлений, при небольшом значении статической силы, под действием которых происходит пластическое деформирование выглаживаемой поверхности.

Поверхности изделий после алмазного выглаживания характеризуются низкими параметрами шероховатости (до $Ra \approx 0.085$ мкм), увеличением микротвёрдости до 60% и формированием остаточных напряжений сжатия с глубиной их залегания до 0,4 мм. Главным недостатком метода АВ является низкая производительность процесса, обусловленная малой величиной пятна контакта инструмента с обрабатываемой деталью.

К способам, основанным на трении качения относятся: накатывание роликами и шариками, вибронакатывание и др. [112].

Основой способа накатывания является поверхностное пластическое деформирование при качении инструмента по поверхности деформируемого изделия. Форма рабочего инструмента — ролики или шарики. В ходе обработки деформирующий элемент прижимается к деформируемой поверхности статическим усилием $P_{\rm CT}$, перемещается относительно неё, совершая вращение вокруг своей оси. Метод накатывания может реализоваться на токарных, строгальных и плоскошлифовальных станках позволяя обрабатывать детали различной формы — цилиндрические, конические, фасонные, наружные и плоские поверхности.

Главным отличием обработки шаром от накатывания роликом является самоустанавливаемость шара относительно обрабатываемой детали, ввиду отсутствия принудительной оси вращения. Кроме этого, наличие точечного контакта обеспечивает высокие удельные давления, позволяя работать и

проводить накатывание с меньшими силами 500-2000 Н. Но имеется и обратный эффект — уменьшается производительность процесса, вследствие снижения подачи инструмента до 0,08-0,15 мм/об [51]. Согласно сведениям [105] перед накатыванием необходимо обеспечить состояние поверхности до Ra=1,6...5 мкм. После обработки параметр Ra снижается до значений 0,2...1,6 мкм. Интенсивное уменьшение шероховатости наблюдается при удельных нагрузках 1000...1400 МПа, и зависит от твёрдости материала [48]. Достижение минимально возможной шероховатости обеспечивается при подаче инструмента S=0,05...0,2 мм с диаметром шара 17...18 мм [105]. Оптимальное применение — обработка деталей средней твёрдости и достаточной жёсткости.

Обкатка роликами широко применяется в тяжёлом машиностроении и при высокой производительности обеспечивает прирост степени упрочнения на 30-50 %, большую глубину упрочнённого слоя (1-3 мм) и малую шероховатость Ra = 0.32 мкм [10]. Применение больших радиальных усилий (свыше 2000 H) ограничивает применимость метода накатывания при обработке роликами нежёстких деталей, и требует высокой жёсткости оборудования.

Кинематика процессов накатывания шариком и роликом относительна проста. Инструмент движется однонаправленно в направлении задаваемыми скоростями обработки и подачи, что ограничивает возможности этого метода изменять направление следов обработки по отношению к оси детали.

Способом, который имеет возможность изменения направления следов обработки относительно оси детали является метод вибронакатывания [112]. В процессе обработки инструменту дополнительно сообщается возвратно - поступательное движение, что приводит к сложному относительному движению деформатора относительно деформируемой детали. При этом на поверхности формируется синусоидальный след. Характер морфологии деталей после вибронакатывания будет определяться сочетанием следов, при

которых возможно создание различных схем каналов: 1 — полностью новый регулярный микрорельеф; 2 — создание каналов, с сохранением исходной поверхности между ними. В углублениях скапливается смазывающий материал и продукты износа. Согласно автору [84] оптимальным вариантом считается, когда площадь канавок составляет 30...35 % от общей площади трения.

вибронакатывания позволяют управлять Особенности состоянием формируемой поверхности в широких пределах. Согласно [112] различные параметры обработки приводят к изменению высот неровностей Ra = 0,2...2,5мкм, радиуса скруглений вершин и впадин $r_{\rm B}$ и $r_{\rm BH} = 1000\text{--}8000$ мкм, угла направления расположения элемента $\beta_1 = 5...180^\circ$, относительной опорной длины поверхности $t_P = 5...90\%$. Больший эффект упрочнения ПС, по сравнению с накатыванием, достигается за счёт многократного воздействия нагрузки сложного относительного движения деформатора И И обрабатываемой поверхности. Ввиду этих особенностей возможно повышение контактной жёсткости и износостойкости деталей в 1,5...3 раза, плавности работы соединений [105]. Вибронакатывание целесообразно применять при обработке деталей, работающих В условиях полужидкостного ИЛИ жидкостного трения.

Недостатками вибронакатывания являются: 1 — ухудшение точности деталей, в результате наплывов, формируемых при выдавливании канавок; 2 — ограниченность применения при накатывании деталей малой жёсткости, вследствие значительных усилий при обработке; сложность создания канавок на изделиях из твёрдых материалов и деталях с покрытиями.

Отличие динамических методов ППД от статических заключается в том, что рабочий инструмент не находится в постоянном контакте с обрабатываемой деталью. К данным методам относятся дробеструйная обработка, ультразвуковое поверхностного пластическое деформирование и т.д. [48, 74, 84].

Основой процесса упрочнения дробью является ударное воздействие летящей с высокой скоростью дроби на деформируемую поверхность изделия. Данный метод нашёл наиболее широкое применение при обработке тонкостенных деталей, деталей сложной конфигурации, работающих в условиях усталости [65]. Дробинки, соударяясь с поверхностью изделия оставляют на ней лунки, образуя при этом пластически деформированную зону. Её размеры и глубина пропорциональны размеру рабочего элемента продолжительности обработки (дроби). При увеличении возрастает следов (лунок) количество формируемых И возрастает вероятность многократное воздействие деформируемых частиц на определённую область упрочняемой детали. Это приводит к увеличению глубины зоны пластической деформации, за счёт многократного воздействия на единицу поверхности. Стабильное состояние поверхности достигается после 10-20 ударов [48]. Кроме этого, увеличение времени процесса приводит к увеличению предела усталости до достижения максимального значения, при его дальнейшем сохранении или снижении. Однако, в этом случае явление перенаклёпа не приводит к существенному снижению эксплуатационных показателей поверхностного слоя [87].

Обработку стальных деталей производят при помощи стальной или чугунной дроби диаметром 0,4...2 мм. При этом размер деформирующих элементов должен быть таким, чтобы обеспечивать обработку пазов, канавок и галтелей. Детали из цветных металлов и сплавов обрабатываются стеклянной или алюминиевой дробью [88].

Применение дробеструйной обработки не приводит к повышению точности детали, шероховатость поверхности не улучшается. При этом достигается увеличение усталостной прочности в 1...14 раз [88]. Исследования показали [48], что предел выносливости при симметричном изгибе повысился на 40...60% для деталей с концентраторами напряжений, без

концентраторов на 20...30%. Глубина упрочнённого слоя достигает 0,5...1,5 мм [65].

Кроме ухудшения геометрического состояния поверхности при дробеструйной обработке, дополнительным недостатком данного метода является ухудшение коррозионной стойкости деталей, вследствие активного переноса частиц дроби на поверхность [74].

Приведённый анализ показал, что для каждого способа ППД имеется своя рациональная область применения, обусловленная формированием рабочего слоя деталей с определённым комплексом характеристик поверхности, который является оптимальным для конкретных условий эксплуатации.

1.2.2 Влияние методов ППД на микрогеометрическое и физикомеханическое состояние поверхности

Формирование поверхностного слоя деталей при обработке методами ППД происходит в результате сложных взаимосвязанных процессов, происходящих в очаге деформирования и прилегающих к ним зон. К этим явлениям можно отнести изменение микрогеометрии, микро- и макроструктуры, множественные упругие и пластические деформации, трение и тепловые процессы, изменение прочностных и пластических свойств обрабатываемого материала [74].

обработки материалов ППД является использование их Основой свойств, способности пластических заключающихся сохранять В возникающие под действием сторонних сил остаточные деформации. Деформирование начинается с вершин микронеровностей и постепенно распространяется на низлежащие слои. Параллельно сглаживая ИХ пластической деформации протекает упругая деформация, И распространяемая по определённым кристаллическим плоскостям [110].

Формирование поверхностного слоя при ППД связано со сложными структурными и фазовыми превращениями. Сначала происходит дробление зёрен металла на блоки и образуется мозаичная структура. Дальнейшее

развитие сдвигов приводит к образованию ещё более мелких зёрен. Кристаллы, имеющие глобоидную форму, сжимаются и вытягиваются в сторону деформирующего усилия, происходит изменение соотношений их размеров. Следствием данных превращений является образование упорядоченной ориентированной волокнистой структуры с анизотропными механическими свойствами. Качественным показателем пластической деформации является волокнистая структура металла [77].

При этом состояние поверхностного слоя становится термодинамически неустойчивым и метастабильным. После применения ППД поверхностный слой характеризуется повышенным сопротивлением деформированию. Упрочнение достигается в основном за счёт лавиноподобного развития дислокаций — дефектов кристаллической решётки, концентрирующихся вблизи линий сдвигов и группирующихся перед препятствиями, возникающими в процессе деформирования или существовавших до него. Увеличение дефектов по плоскостям скольжения (дефектов) служит препятствием для протекания процессов пластической деформации, то есть приводит к упрочнению поверхностного слоя.

При повышении скорости деформации сокращается время воздействия деформирующих напряжений, что приводит к пластической деформации в меньшем объёме [100]. Поэтому, по причине постоянства давления увеличивается величина деформирующих напряжений, усиливается интенсивность формирования дислокаций и ускорение образования тонкой структуры, что в итоге приводит к большему упрочнению.

Увеличение деформационного усилия приводит к росту твёрдости до определённого предела. В случаях завышения силовых параметров обработки может наблюдаться явление перенаклёпа, приводящего к формированию в поверхностном слое микротрещин, отслоению металла [74]. При этом наблюдается значительное увеличение шероховатости.

Повторное воздействие деформирующим(и) элементом(ами) приводит к дополнительному пластическому деформированию ПС, но при этом оно затруднено по причине упрочнения металла при предыдущем воздействии. Также не наблюдается активного перераспределения материала во впадины, поскольку он был перераспределён ранее, повышение твёрдости также становится незначительным [110]. Общая глубина упрочнения формируется при первичном деформировании поверхности, поскольку повторная обработка ведёт к распространению деформации в малом объёме и практически не оказывает влияния на её распространение в глубь детали.

Также стоит отметить, что при проведении ППД на оптимальных режимах в зоне обработки не возникает температур, близких к температуре рекристаллизации, что не оказывает влияния на фазовые превращения в ПС. Это исключает снижение твёрдости поверхности из-за теплового воздействия. Стоит отметить, что в отличие от явления перенаклёпа, при наклёпе возможно восстановление исходной структуры и механических свойств ПС, в следствие термического воздействия.

Применение ППД чаще всего положительно сказывается на микрогеометрическом состоянии поверхностного слоя. При этом наблюдается изменение следующих параметров шероховатости: уменьшение среднеарифметического отклонения профиля (Ra), увеличение радиуса закругления вершин микровыступов и относительной опорной длины профиля микронеровностей (t_P) .

Остаточные напряжения также являются важной характеристикой качества ПС. Определение их зависимости от степени пластической деформации и влияния на усталостную прочность трудно сопоставить, поскольку в литературных данных этот вопрос рассматривается в отдельном случае и на конкретных материалах [10].

Таким образом можно сделать вывод о том, что применение различных методов ППД позволяет повышать физико-механическое и

микрогеометрическое состояние поверхности обеспечивая высокие эксплуатационные показатели деталей.

1.3 Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование

Одним из перспективных методов ППД является ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УЗПД). Основой процесса УЗПД является обработка инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой. Осцилляция создаётся колебательной системой, в которую входят генератор переменного напряжения ультразвуковой частоты, пьезокерамический или магнитострикционный преобразователь и волновод. Вследствие суммарного статического И динамического воздействия инструмент пластически деформирует обрабатываемую поверхность. Статическое нагружение осуществляется при помощи системы грузов или тарированной пружины.

1.3.1 Влияние ультразвуковых колебаний на процесс пластического деформирования

Сообщение инструменту ультразвуковых колебаний обуславливает нестационарный характер взаимодействия деформатора с обрабатываемой деталью, изменяющийся с высокой скоростью. Это приводит к возникновению сложного напряжённо-деформированного состояния в очаге деформирования, интенсификации пластического поведения материала, которые в значительной степени будут определяться направлением колебаний, их типом, частотой и амплитудой. Кроме того, наличие осциллирующего движения инструмента сказывается на силах внешнего трения при взаимодействии инструмента с поверхностью детали. Данные особенности создают условия для более глубокой обработки поверхности (применение УЗПД возможно после черновых операций) и формирования остаточных напряжений, положительно сказывающихся на эксплуатационных свойствах деталей [10, 62, 68, 79, 108].

При воздействии ультразвука на поверхность твёрдых тел может наблюдаться два нелинейных эффекта — акустическое разупрочнение и

акустическое упрочнение. При воздействии ультразвуковых волн высокой интенсивности наблюдается разупрочнение, вследствие уменьшения статического напряжения, необходимого для реализации пластической деформации. После ультразвукового воздействия имеет место эффект акустического упрочнения.

Эффект ультразвукового разупрочнения установлен для моно и поликристаллов различных металлов и сплавов [61]. Для объяснения этого явления используют теорию дислокаций. Процесс пластической деформации осуществляется за счёт движения подвижных дислокаций, или зарождения новых если их нет в кристалле или они обладают малой подвижностью. В процессе движения дислокаций им попадаются различного рода препятствия (вакансии, примесные атомы, иначе ориентированные дислокации) приводящие к их торможению. В данном случае дальнейшее движение пластической деформации возможно за счёт приложения внешней энергии, например, энергии ультразвуковых колебаний.

Основой активации дислокаций является поглощение акустической энергии в местах дефектов кристаллической решётки и прочих несовершенств. Вследствие быстроты протекания процесса происходит локальный нагрев вокруг источников поглощения, снятие напряжений, освобождение дислокаций, увеличение их подвижности, что приводит к увеличению интенсивности протекания пластической деформации.

В работах [6, 7] приведено исследование по определению возможности применения ультразвука в процессах обработки металлов давлением. Положительный эффект воздействия ультразвука наблюдается при волочении проволоки и труб, ковке, штамповке, прокатке и прессовании. Доказано, что применение ультразвуковых колебаний приводит к изменению механических свойств деформируемого материала, сопротивления деформации и сил контактного трения между инструментом и заготовкой.

Влияние ультразвука на контактное трение объясняется изменением характера контакта деформатора и обрабатываемой детали, а эффективностью действия смазки. Изменение сил контактного трения достигается изменением направления ввода колебаний относительно вектора сил трения (рисунок 1.1). Из результатов исследования различных пар трения сталь-сталь сталь-медь установлено, что наименьшее значение коэффициента трения наблюдается при вводе колебаний параллельно поверхности детали и силы трения (см. рис. 1.1, а). Меньший эффект наблюдается при колебаниях инструмента параллельно контактируемой поверхности и перпендикулярно силе трения (схема "б"), и достигает наибольшего значения при вводе колебаний перпендикулярно поверхности детали и силе трения (схема "в") [61].

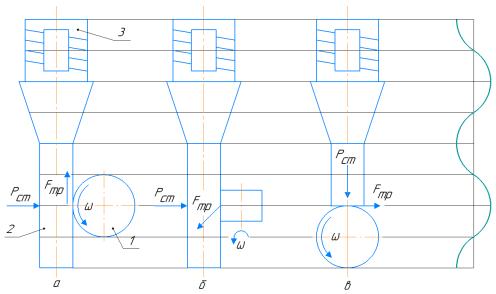


Рисунок 1.1 — Схемы ультразвуковых систем при различных условиях трения a — ввод колебаний параллельно контактируемой поверхности и силе трения, 6 — колебания параллельно контактируемой поверхности и перпендикулярно силе трения, B — ввод колебаний перпендикулярно контактируемой поверхности и силе трения; 1 — деталь, 2 — волновод, 3 — ультразвуковой преобразователь, P_{CT} — статическая нагрузка, ω — круговая частота, F_{TP} — сила трения

Влияние скорости главного движения (V_V) на трение также зависит от схемы введения ультразвуковых колебаний. При использовании схем "а" и "б"

увеличение V_V приводит к уменьшению эффективности действия ультразвуковых колебаний, а для схемы "в" увеличивается.

Схожее влияние оказывает и изменение амплитуды колебаний (A). Так увеличение A в схемах "а" и "б" приводит к появлению эффекта схватывания, резко увеличивающего коэффициент трения. Обратный эффект наблюдается в схеме "в", особенности которой препятствуют схватыванию поверхностей.

колебаний Применение ультразвуковых оказывает эффективность смазок. Пластическая деформация приводит к изменению энергии поверхности, что сказывается на адгезионной и адсорбционной способности металла относительно смазывающих веществ. Кроме этого, при изменении микрогеометрии поверхности в процессе обработки излишки смазки вытесняются из масляных карманов, по причине изменения их объёмов, обеспечивают изоляцию мест тесного контакта и предотвращают схватывание между контактируемыми поверхностями. При этом наблюдается засасывание масла в зазор между инструментом и деталью, обусловленное его циклическим изменением. Также наблюдается снижение сопротивления сдвига смазки в её объёме. Повышение смазывающего эффекта достигается за счёт механических особенностей процесса – высокочастотные колебания обеспечивая приводят К распылению смазки, более равномерное распределение по поверхности контакта [62].

1.3.2 Схемы ультразвуковой обработки поверхностей

Первые сведения об ультразвуковом поверхностного пластическом деформировании можно найти в работах Муханова И.И. и его учеников. Под его руководством в 1962 году в Новосибирском электротехническом институте на кафедре «Технология машиностроения» была создана научно-исследовательская лаборатория, по изучению процесса УЗПД. Исследования сотрудников (Асанов В.Б., Безнедельный А.И., Гилета В.П., Рахимянов Х.М., Синдеев В.И., Исхакова Г.А., Никитин Ю.В., Семенова Ю.С.) лаборатории привнесли значительный вклад в изучение особенностей и реализации метода

ультразвукового поверхностного пластического деформирования [2, 8, 11, 21, 50, 73, 90, 91, 97]. В ряде работ предложены математические модели формирования микрогеометрического и физико-механического состояния поверхностного слоя.

Применение УЗПД возможно при различном направлении колебаний инструмента, относительно обрабатываемой поверхности. На сегодняшний день имеются два основных способа УЗПД, при которых осциллирующее движении инструмента направлено по нормали (рисунок 1.2, а) или тангенциально (рисунок 1.2, б) к обрабатываемой поверхности [76].

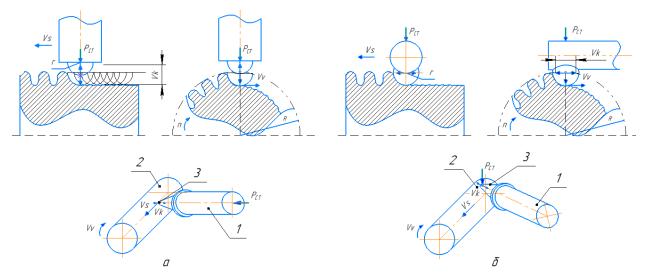


Рисунок 1.2 – Схемы УЗПД при различных направлениях ввода колебаний относительно обрабатываемой поверхности:

а — обработка по нормальной схеме; б — обработка по тангенциальной схеме; V_S — направление скорости подачи инструмента, V_V — направление скорости главного движения, V_K — направление колебательной скорости инструмента,

 $P_{\rm CT}$ — статическая сила, 1 — магнитострикционный преобразователь; 2 — обрабатываемая деталь; 3 — концентратор продольных колебаний

Наибольшее распространение получила схема с вводом колебаний по нормали к обрабатываемой поверхности. УЗПД по данной схеме основано на ударном воздействии деформирующего инструмента по упрочняемой поверхности. Рабочим инструментом является деформатор, фиксируемый на торце волноводной системы, осциллирующей с ультразвуковой частотой.

Прижим деформатора обеспечивается статическим усилием P_{CT} , создаваемым системой грузов или с помощью пружины.

Технологическими УЗПД, параметрами влияющими на эксплуатационные свойства и микрогеометрическое и физико-механическое состояние поверхностного слоя, являются: амплитуда колебаний инструмента A, статическое усилие $P_{\rm CT}$, радиус деформирующего инструмента r_1 , частота колебаний f, подача инструмента S, скорость главного движения детали V_V . В большинстве случаев используются следующие диапазоны варьирования параметров: небольшое значение статической силы ($P_{\rm CT} = 30...300$ H), амплитуда колебаний (A = 2...20 мкм), частота колебаний инструмента (f =18...66 кГц), которые обеспечивают прерывистый контакт деформатора с обрабатываемой поверхностью (время контакта $t = 3 \cdot 10^{-5}$ c), высокие значения колебательной скорости ($V_K = 1...3$ м/с) и ускорения ($j \ge 24 \cdot 10^4$ м/с²) инструмента, высокую степень перекрытия следов обработки (N > 150 мм⁻²).

Выбор оптимальных параметров обработки зависит от физикомеханических свойств материала и формы обрабатываемого изделия, а также требований к итоговому состоянию ПС.

Главной целью применения данного метода является формирование поверхностного слоя с высокими эксплуатационными свойствами. Схеме УЗПД с вводом колебаний по нормали к обрабатываемой поверхности посвящено множество работ. Исследованием данного метода занимались Асанов В.Б. [8], Боровин Ю.М. [12], Борозна В.Ю. [13], Гилета В.П. [22], Семенова Ю.С. [97], Никитин Ю.В. [73] и др. В их работах установлено влияние режимов УЗПД на итоговое состояние поверхностного слоя деталей из различных материалов: конструкционных, инструментальных и легированных сталей, жаропрочных и титановых сплавов, чугуна.

В работе [8] проводилось УЗПД деталей из различных материалов. Использование процесса ультразвуковой обработки на сырых материалах: сталь 10, У8, У12, сталь 45, позволяет: уменьшать параметр шероховатости *Ra*

с 5 до 0,33 мкм, повышать твёрдость поверхности на 100-150 % достигая глубины упрочнения до 0,6 мм на режимах 2A=15...20 мкм, $V_V=30...40$ м/мин, $P_{\rm CT}=30...150$ H, S=0,07 мм/об. Использование УЗПД при обработке термообработанных сталей У12, ШХ15 на режимах: 2A=25 мкм, $P_{\rm CT}=250$ H, $V_V=48$ м/мин, S=0,07 мм/об, привело к уменьшению шероховатости по параметру Ra с 0,32 мкм до 0,12...0,15 мкм, повышению степени наклёпа на 30-40 % с глубиной распределения деформации до 0,2...0,3 мм [8].

Основное внимание в работе Боровина Ю.М. [12] обращено на изменение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при финишной ультразвуковой обработке. Исследования проводились на деталях тел вращения. Определено влияние параметров процесса УЗПД на физико-механическое и геометрическое состояние ΠC : при увеличении P_{CT} , Aи уменьшении r_1 наблюдается прирост микротвёрдости, в то время как шероховатость и волнистость поверхности уменьшаются. В процессе разработана математическая исследований была модель определения геометрического состояния обработанной поверхности итогового зависимости от режимов УЗПД. В ней учтено влияние исходного микрогеометрического состояния на формируемую шероховатость волнистость поверхности, но изменение физико-механических характеристик (изменение микроструктуры, определение плотности дислокаций) отражено.

Повышение физико-механических свойств титановых сплавов путём модифицирования поверхности и формирования композитного металл-полимерного слоя ультразвуковой обработкой описано в работе [13]. УЗПД образцов из титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 проводилось на следующих режимах: f = 22 кГц, $V_V = 20$ м/мин, S = 0.04 мм/об, и позволило добиться значения параметра шероховатости Ra = 3.5 мкм. При этом обработка деталей из ВТ1-0 привела к увеличению твёрдости ПС H_{μ} с 2400 до 4000 МПа с глубиной наклёпа до h = 0.12 мм и средним диаметром зерна $d_3 = 100$ нм, а из

сплава ВТ6 с твёрдостью по Бринеллю НВ увеличивающейся с 4000 до 5400 МПа с h = 0.04 мм и $d_3 = 50$ нм. Установлено, что изменение температуры в процессе УЗПД на данных режимах обработки значительно ниже температуры полиморфного превращения титана, благодаря чему формируется наноструктура в приповерхностном слое.

Исследования Гилеты В.П. [22] проводились на образцах из стали 45. В представленной работе даны технологические рекомендации по применению метода УЗПД с целью обеспечения качества ПС изделий. Описана модель регулярно-фрагментированной формирования микрогеометрии, учитывающая зависимость размеров фрагмента от режимов обработки и показаны пути создания различных типов рельефа. Установлено, что УЗПД применение позволяет достигать следующего состояния поверхностного слоя изделий из данного материала: микрогеометрические параметры — Ra=0.13 мкм, Sm=40 мкм, $S_H=16$ мкм, $t_P=0.45$ мкм, физикомеханические – h=0,125 мм, $\frac{\Delta H_{\mu}}{H_{\mu}}=20$ %, $\sigma_{\tau}=$ - 800 МПа [22].

В работе Семёновой Ю.С. [97] выявлен механизм образования волнистости поверхности, сущность которого заключается в накоплении и сбросе гребня волны пластического течения материала, формируемого путём его выдавливания из очага деформации. Установлено, что диаметр отпечатка при обработке материалов с твёрдостью выше НВ = 5000 МПа сильно уменьшается и обеспечивает исключение образования волнистости при проведении УЗПД в используемом диапазоне технологических параметров. Описанная в работе модель процесса позволяет прогнозировать формирование волнистости на обрабатываемой поверхности, без учёта физико-механических характеристик ПС.

Никитин Ю.В. занимался вопросом формирования ПС на деталях из серого чугуна обработкой на основе УЗПД и плазменного нагрева [73]. Исследования проводились на образцах из серого чугуна СЧ 21, при следующих параметрах обработки: $P_{\rm CT}=30...270~{\rm H}, f=20~{\rm к}\Gamma{\rm ц}, A=10...30$

мкм, $r_1 = 4$ мм, $V_V = 0,5...17,5$ м/мин. При этом удалось достичь уменьшения параметра шероховатости *Ra* с 2,2 до 0,7 мкм, добиться увеличения микротвёрдости до $H_{\mu}=4000~{\rm M}\Pi a$ с глубиной упрочнённого слоя до h=0.95мм. В работе установлено, что значение статической силы в большей степени влияет на формирование упрочнённого слоя, по сравнению с изменением амплитуды колебаний. Разработанная математическая модель позволяет ПС напряженное состояние И остаточные обрабатываемой поверхности. Получено уравнение, с помощью которого можно оценить глубину получаемого наклёпа в зависимости от параметров УЗПД при упругопластическом контакте тел произвольной кривизны. Приведено выражение для определения высоты неровностей поверхностного применения ультразвукового пластического деформирования.

Особое внимание стоит уделить работе Степчевой З.В. [99] направленной эффективности на повышение алмазного выглаживания на основе рационального использования энергии модулированного ультразвукового поля. Главной особенностью работы является применение УЗПД при различном направлении колебаний инструмента - как радиальных, так и тангенциальных. Было доказано, что в некотором промежутке времени активная составляющая силы трения изменяется на реактивную и обуславливает уменьшение коэффициента трения. Исследование проводилось на образцах из стали 40Х, Р18, 30ХГСА, 95Х18, 12Х18Н10Т и титанового сплава BT3-1, при параметрах УЗПД: $P_{CT} = 10...200 \text{ H}$, A = 8...14 мкм, f = 18,6к Γ ц, $r_1 = 1,5...3$ мм, $V_V = 25...52$ м/мин, S = 0,036...0,064 мм/об. После обработки наблюдалось формирование остаточных напряжений до $\sigma = -570$ МПа с глубиной упрочнённого слоя h = 250 мкм, параметра шероховатости Raи микротвёрдости HV для различных материалов: Ra = 0.1 мкм и HV = 3900МПа, Ra = 0.08 мкм и HV = 4500 МПа, Ra = 0.6 мкм и HV = 5300 МПа для стали 40Х, 95Х18 и титанового сплава ВТ3-1, соответственно. Разработана математическая модель накопления деформации при УЗПД с учётом модуляции и различных условий ввода колебаний. Приведено аналитическое описание формируемого микрогеометрического состояния поверхности после обработки. Предложена и экспериментально подтверждена возможность образования упорядоченного строения микрорельефа с заданными микрогеометрическими и физико-механическими параметрами поверхностного слоя.

Работа Осипенковой Г.А. и Пегашкина В.Ф. [76] посвящена отделочноупрочняющей обработке с применением крутильных колебаний. Направление деформатора в колебаний данном методе находится плоскости, расположенной в касательной плоскости к обрабатываемой поверхности. Обработка образцов из 15ХГН2ТА велась на следующих технологических режимах: $P_{\text{CT}} = 3...17 \text{ H}$, A = 22...44 мкм, $f = 18 \text{ к}\Gamma\text{ц}$, $r_1 = 2,1 \text{ мм}$, S = 0,08...0,29мм/об. Применение УЗПД при крутильных колебаниях деформатора привели к увеличению твёрдости с H_{μ} = 3400 до 8870 МПа при значении шероховатости Ra = 0.12 мкм, с глубиной упрочнения h = 0.4 мм. Экспериментально определено, что в процессе приработки износ поверхности уменьшился на 50 %, а период установившегося изнашивания возрос на 25 %. Разработанные математические модели позволяют назначать требуемые режимы УЗПД при колебаниях. Обнаружено, деформирующий крутильных ЧТО наблюдается и при обратном движении деформатора, который обуславливает при определённых условиях обработки уменьшение высотных параметров шероховатости. Применение обработки данного метода позволяет формировать как новый регулярный микрорельеф, так и частичный. Было выявлено влияние глубины внедрения, подачи, а также частоты вращения деформатора на коэффициент регулярности микрорельефа ПС. Главным недостатком схемы с использованием крутильных колебаний является целесообразность ограничивает сложность реализации, которая eë применения.

1.4 Цель и задачи исследования

Как показал анализ рассматриваемой литературы имеется значительное исследований количество метода ультразвукового поверхностного пластического деформирования, в которых широко и доступно описаны его преимущества И рациональные области применения. Формирование поверхностных слоёв деталей, высокими характеризующихся эксплуатационными свойствами, полученных помощью высокоинтенсивного поверхностного упрочнения актуальной является технологической задачей.

Анализ приведённых данных указывает на то, что применение УЗПД в качестве финишного метода обработки деталей и покрытий обеспечивает формирование поверхностных слоёв с улучшенными эксплуатационными свойствами. Это обусловлено кинематико-динамическими параметрами процесса обработки при использовании колебаний ультразвуковой частоты, приводящих к интенсификации течения материала, обуславливающего высокие степени деформационного упрочнения. Специфика деформирования большое обрабатываемого материала И количество технологических параметров обеспечивают возможность формирования специфической микрогеометрии и изменение физико-механического состояния поверхности. При этом упрочняюще-чистовой эффект при УЗПД зависит как от режимов обработки, так и от механических свойств обрабатываемых деталей, исходной шероховатости, волнистости исходной поверхности.

Имеющиеся математические модели не дают комплексной оценки состояния поверхностного слоя деталей, а устанавливают взаимосвязь между параметрами УЗПД и микрогеометрическими, либо физико-механическими характеристиками обработанных поверхностей. Остаётся не полностью решённым вопрос оптимального состояния ПС с точки зрения обеспечения ресурса изделия при эксплуатации.

Несмотря на большое количество исследований, не все потенциальные возможности этого метода вскрыты. Практически все работы по применению ультразвукового деформирования направлены на модификацию поверхностей деталей, выполненных из металлов и сплавов средней и высокой твёрдости, а возможности повышения эксплуатационных свойств изделий из пластичных материалов практически не изучены. Поскольку современное развитие машиностроения характеризуется широким применением пластичных металлов и сплавов, то остаётся не исследован вопрос применения УЗПД для обеспечения упрочняюще-чистового эффекта на деталях, изготовленных из данных материалов (рисунок 1.3).

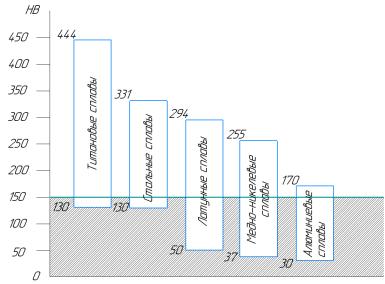


Рисунок 1.3 – Твёрдость конструкционных металлических сплавов

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 [94]. Одним из путей решения данной проблемы является изменение условий нагружения в очаге деформирования, за счёт смены направления ввода ультразвуковых колебаний.

В связи с этим целью данной работы является разработка технологии формирования поверхностных слоёв с повышенными требованиями к уровню микрогеометрических и физико-механических характеристик на деталях из

пластических 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.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СХЕМ УЗПД НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТНОСТИ

Значимой проблемой современного машиностроения является повышение эксплуатационных показателей качества деталей машин путём обеспечения рационального набора физико-механических и микрогеометрических параметров поверхностного слоя (ПС).

В связи с этим имеется необходимость изучения закономерностей формирования микрогеометрического состояния ПС в процессе УЗПД с вводом колебаний по различным схемам к обрабатываемой поверхности, установление математических зависимостей значений параметров поверхностного слоя от режимов обработки.

2.1 Кинематические особенности различных схем ультразвукового поверхностного пластического деформирования

Согласно литературным данным кинематика процесса поверхностного пластического деформирования влияет на качество упрочнённого слоя [44]. Для того чтобы обосновать выбор рациональной схемы ультразвукового поверхностного пластического деформирования и оценки её влияния на формирование микрогеометрического состояния поверхности после УЗПД необходим анализ динамических и кинематических зависимостей данной обработки.

УЗПД с введением колебаний по нормали к обрабатываемой поверхности.

Использование схемы с вводом ультразвуковых колебаний деформатора по нормали к обрабатываемой поверхности получило наибольшее распространение и рекомендуется при обработке металлов и сплавов высокой твёрдости (рисунок 2.1).

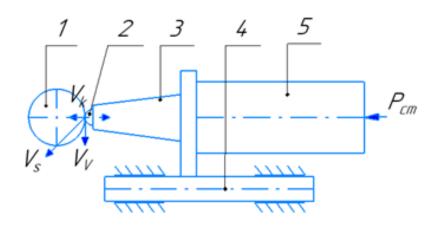


Рисунок 2.1 – УЗПД по нормальной схеме

1 – обрабатываемая деталь, 2 – деформатор, 3 – волновод, 4 – направляющая,

5 — магнитострикционный преобразователь: $P_{\rm CT}$ — статическая нагрузка, V_S — направление скорости подачи инструмента, V_V — направление скорости главного движения, V_K — направление колебательной скорости инструмента

При наличии колебаний скорость перемещения инструмента относительно обрабатываемой детали определяется выражением

$$\overline{V_{PE3}} = \overline{V_V} + \overline{V_K} + \overline{V_S} \tag{2.1}$$

где $\overline{V_V}$ — вектор скорости главного движения, $\overline{V_S}$ — вектор скорости подачи, $\overline{V_K}$ — вектор колебательной скорости инструмента.

Скорость главного движения (м/c) при обработке цилиндрических деталей определяется соотношением

$$V_{V} = \frac{\pi Dn}{1000 \cdot 60} \tag{2.2}$$

где D — диаметр обрабатываемой детали (мм), n — число оборотов детали в минуту

Скорость подачи (м/с) определяется соотношением

$$V_{S} = \frac{Sn}{1000 \cdot 60} \tag{2.3}$$

где S — подача инструмента (мм/об)

Колебательное смещение инструмента, описывается выражением

$$A_0 = A\sin(\omega t) \tag{2.4}$$

где A — амплитуда ультразвуковых колебаний, мкм, ω — круговая частота (ω = $2\pi f$), f — частота колебаний, (c^{-1}), t — время (c)

Тогда скорость колебательного движения инструмента будет равна:

$$V_{K} = \omega A \cos(\omega t) \tag{2.5}$$

Описание кинематических параметров процесса ультразвукового поверхностного пластического деформирования тел вращения рассмотрено в прямоугольной системе координат. При этом - ось X — совпадает с направлением главного движения, ось Y — имеет радиальное направление, ось Z — в направлении подачи. С целью упрощения анализ кинематических особенностей проводился при условии, что деталь фиксирована, а все виды движения (вращательное, поступательное, колебательное) совершает деформирующий инструмент.

При рассмотрении метода УЗПД с вводом колебаний по нормали к обрабатываемой поверхности компоненты траектории движения инструмента в направлении осей координат описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} L_X = V_V t \\ L_Y = A \sin(2\pi f t) \\ L_Z = V_S t \end{cases}$$
(2.6)

Данная траектория представляет собой винтовую линию с углом подъёма α (рисунок 2.2, в), который можно определить из выражения:

$$tg\alpha = \frac{S}{\pi D} \tag{2.7}$$

При этом результирующая скорость перемещения деформатора относительно обрабатываемой поверхности равна (рисунок 2.2, в):

$$V_{pes} = \sqrt{V_V^2 + V_K^2 + V_S^2} \tag{2.8}$$

Ускорение:

$$j = \frac{dV_{PE3}}{dt} = -\frac{4\pi^2 f^2 A V_K \sin(2\pi f t)}{\sqrt{V_S^2 + V_V^2 + V_K^2}}$$
(2.9)

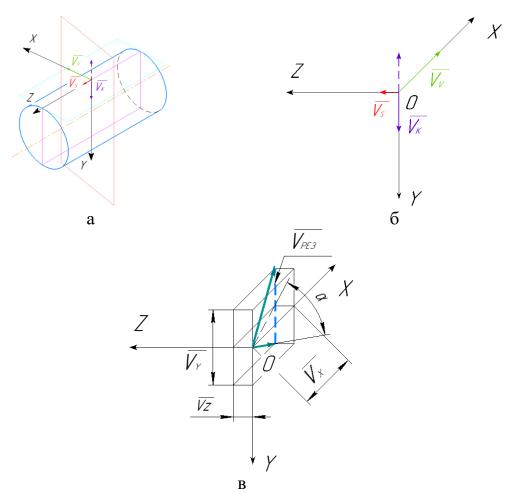


Рисунок 2.2 — Схема направления скоростей движений рабочего инструмента при УЗПД (колебания по нормали): а) расположение векторов скоростей обработки относительно зоны контакта деформатора с поверхностью детали, б) расположение векторов скоростей обработки, в) диапазон варьирования $\overline{V_{\tiny \text{PF3}}}$

Из анализа выражений (2.6-2.8) и рисунка 2.2 видно, что перемещение инструмента происходит в трёх плоскостях. Из этого становится понятным наличие дробности контакта деформирующего инструмента с поверхностью детали при применении УЗПД по данной схеме — часть времени деформатор углубляется в обрабатываемую поверхность обеспечивая их контакт, а в другой части периода колебаний направление результирующей скорости направлено от центра обрабатываемой детали, что приводит к потере контакта между ними. Данная особенность обуславливает высокую скорость деформирования и реализацию максимального деформационного эффекта

УЗПД, что благоприятно сказывается при обработке изделий из металлов и сплавов высокой твёрдости (более НВ150). Нормальная составляющая воздействия $(P_{\rm H})$ представляет собой сумму силового статического нагружения $(P_{\rm CT})$ и динамической силы $(P_{\rm Д})$, последняя обусловлена наличием упругих ультразвуковых колебаний инструмента, ведущих к дробности процесса УЗПД, а касательная составляющая ($P_{\rm K}$) будет определяться трением между контактируемыми поверхностями.

УЗПД по тангенциальной схеме.

тангенциальной рабочий схеме наложение на инструмент ультразвуковых колебаний направленно по касательной к обрабатываемой поверхности (УЗПД по тангенциальной схеме) (рисунок 2.3).

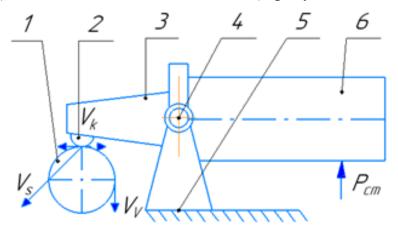


Рисунок 2.3 – УЗПД по тангенциальной схеме

1 – обрабатываемая деталь, 2 – деформатор, 3 – волновод, 4 – ось качания, 5 – основание, 6 – магнитострикционный преобразователь: $P_{\rm CT}$ – статическая нагрузка, V_S – направление скорости подачи инструмента, V_V – направление главной скорости инструмента, V_K – направление колебательной скорости

инструмента

В процессе УЗПД по тангенциальной схеме деформатор [3, 4, 95], за время обработки t, оставляет на поверхности след, проекции которого на оси координат равны:

$$\begin{cases} L_X = V_V t + A \sin(2\pi f t) \cos \beta \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t + A \sin(2\pi f t) \sin \beta \end{cases}$$
 (2.10)

где β — угол между векторами скорости главного движения и колебательной скорости (угол ввода колебаний)

При этом, ввиду наличия нескольких видов движения инструмента, его результирующая скорость описывается выражением [95]

$$V_{PE3} = \sqrt{(V_V + V_K \cos \beta)^2 + (V_S + V_K \sin \beta)^2}$$
 (2.11)

Из уравнения 2.11 ясно, что V_{PE3} не постоянна по величине, и в значительной степени определяется величиной колебательной скорости инструмента и углом ввода колебаний, диапазон изменения которой описывается годографом векторной функции $V_{PE3}-EC$ (рисунок 2.4, в). Наличие осциллирующего движения обуславливает одновременное изменение проекций результирующей скорости на оси $(\overline{V_\chi}$ и $\overline{V_Z}$) обеспечивая изменение направления и величины $\overline{V_{PE3}}$ в широком диапазоне. Решение выражения 2.11, при постоянных значениях главной скорости, амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний и скорости подачи приведено на рисунке 2.4 ($\beta = const$).

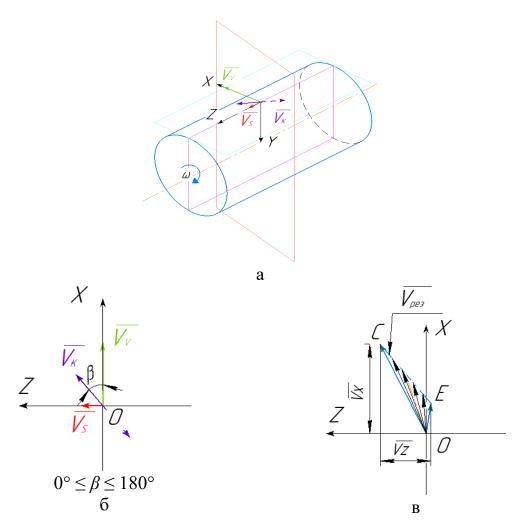


Рисунок 2.4 — Схема направления скоростей движений рабочего инструмента при УЗПД (колебания - в касательной плоскости при $0^{\circ} \le \beta \le 180^{\circ}$): а) расположение векторов скоростей обработки относительно зоны контакта деформатора с поверхностью детали, б) расположение векторов скоростей обработки, в) диапазон варьирования $\overline{V_{\scriptscriptstyle PE3}}$

Согласно схеме (см. рис. 2.4, в), изменение $\overline{V_{PE3}}$ ограниченно областью OCE, лежащей в плоскости XOZ, что обуславливает непрерывный контакт деформатора с обрабатываемой деталью.

Переменный характер результирующей скорости обусловливается наличием ускорения инструмента, описываемого выражением (2.12) [95].

$$j = \frac{dV_{PE3}}{dt} = \frac{-2\pi^2 f^2 A \sin(2\pi f t)((2V_S + V_{KS}) \sin \beta + (2V_V + V_{KC}) \cos \beta)}{\sqrt{(V_S + V_{KS})^2 + (V_V + V_{KC})^2}}$$
(2.12)

, где $V_{KS} = V_K sin(\beta), \ V_{KC} = V_K cos(\beta)$

Наличие непрерывного контакта между обрабатываемой деталью и деформатором приводит к отличному от нормальной схемы силовому воздействию. При этом нормальная составляющая силового воздействия ($P_{\rm H}$) равна статическому нагружению ($P_{\rm CT}$), а тангенциальная составляющая представляет собой силу трения ($P_{\rm K}$), которая может иметь как активный, так и реактивный характер в зависимости от соотношения главной и колебательной скоростей.

Из анализа выражения (2.11) видно, что величина $\overline{V_{PE3}}$ определяется как значениями $\overline{V_V}$, $\overline{V_K}$, $\overline{V_S}$, так и углом ввода колебаний β , значение которого можно варьировать от 0 до 180°. При этом наблюдаются два частных случая применения УЗПД по тангенциальной схеме - при $\beta=0$ ° и $\beta=90$ °. В первом случае (рисунок 2.5) система уравнений принимает следующий вид:

$$\begin{cases} L_X = V_V t + A \sin(2\pi f t) \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t \end{cases}$$
(2.13)

При результирующей скорости перемещения:

$$V_{PE3} = \sqrt{(V_V + V_K)^2 + {V_S}^2}$$
 (2.14)

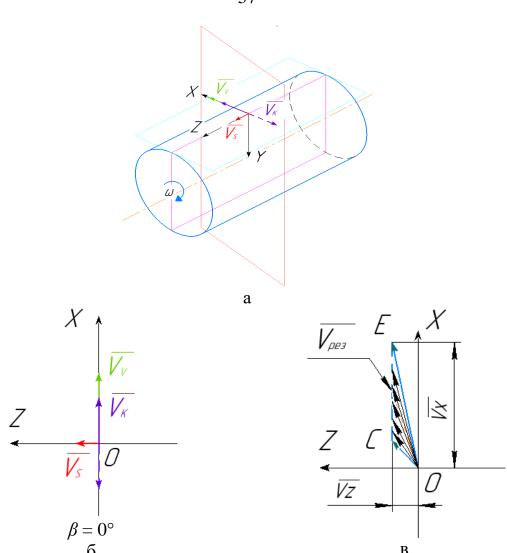


Рисунок 2.5 — Схема направления скоростей движений рабочего инструмента при УЗПД (колебания - в касательной плоскости, при $\beta=0^\circ$): а) расположение векторов скоростей обработки относительно зоны контакта деформатора с поверхностью детали, б) расположение векторов скоростей обработки, в) диапазон варьирования $\overline{V_{\scriptscriptstyle PE3}}$

Из рисунка 2.5 видно, что при $\beta=0^\circ$ переменный характер наблюдается только у составляющей результирующей скорости $\overline{V_\chi}$, область изменения которой определяется величинами $\overline{V_V}$ и $\overline{V_K}$.

Иное поведение наблюдается при $\beta = 90^\circ$ (рисунок 2.6). Составляющие траектории перемещения определяются [95]

$$\begin{cases} L_X = V_V t \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t + A \sin(2\pi f t) \end{cases}$$
 (2.15)

а результирующая скорость

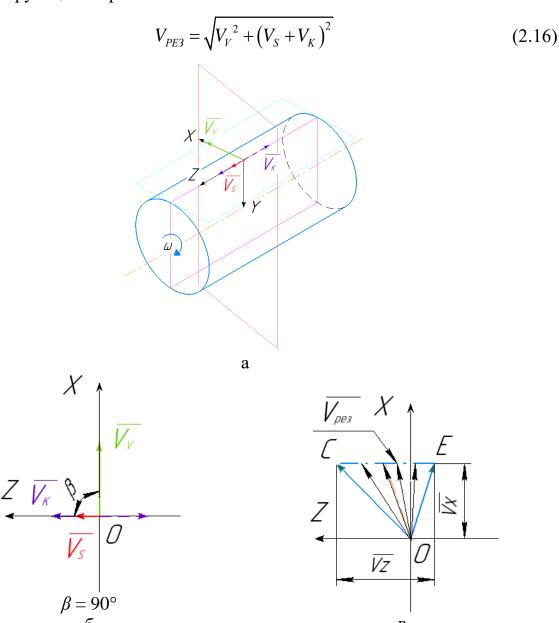


Рисунок 2.6 — Схема направления скоростей движений рабочего инструмента при УЗПД (колебания - в касательной плоскости, при β = 90°): а) расположение векторов скоростей обработки относительно зоны контакта деформатора с поверхностью детали, б) расположение векторов скоростей обработки, в) диапазон варьирования $\overline{V_{PE3}}$

При вводе колебаний под углом $\beta=90^\circ$ изменяется характер поведения составляющих результирующей скорости - $\overline{V_{_{\rm X}}}$ постоянна, а $\overline{V_{_{Z}}}$ является переменной величиной.

Приведённые схемы (см. рис. 2.4-2.6) показывают, что использование УЗПД по тангенциальной схеме позволяет управлять величиной и направлением $\overline{V_{PE3}}$ в широком диапазоне. При этом наличие переменного характера результирующей скорости и ускорения рабочего инструмента определяет направление и интенсивность перераспределения материала в очаге деформирования, изменяя микрогеометрическое и физико-механическое состояние поверхностного слоя обработанной детали.

В связи с тем, что значения $\overline{V_V}$, $\overline{V_K}$, $\overline{V_S}$ определяются режимами обработки, то их изменение позволяет управлять величиной и направлением результирующей скорости в широком диапазоне.

Схема процесса УЗПД с использованием крутильных колебаний приведена на рисунке 2.7.

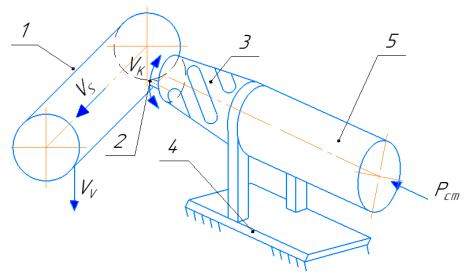


Рисунок 2.7 — УЗПД с использованием крутильных колебаний 1 — обрабатываемая деталь, 2 — деформатор, 3 — волновод, 4 — основание, 5 — магнитострикционный преобразователь: $P_{\rm CT}$ — статическая нагрузка, V_S — направление скорости подачи инструмента, V_V — направление скорости главного движения, V_K — направление колебательной скорости инструмента

Из рисунка 2.7 видно, колебания деформатора находятся в касательной плоскости. Анализ представленной схемы показывает, что использование крутильных колебаний дает схожие кинематические и динамические характеристики тангенциальной схемой. Результаты применения обработки ультразвуковой данным схемам будут обеспечивать ПО формирование поверхности с примерно равными микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками. Учитывая тот факт, что реализация схемы УЗПД с использованием крутильных колебаний наиболее сложна, то в рамках данной диссертационной работы данная схема не исследовалась.

Анализ приведённых схем показывает, что они имеют различные кинематические и силовые параметры. Учитывая тот факт, что применение УЗПД по схеме с вводом колебаний по нормали к обрабатываемой поверхности, даже при незначительных статических нагрузках, вызывает интенсивное течение материала (вследствие чрезмерного значения $P_{\rm H}$) в зоне деформирования и образование волнистости на поверхности деталей, выполненных из металлов и сплавов с твёрдостью менее НВ150, что по техническим требованиям к изделиям, в большинстве случаев, недопустимо. Поэтому уменьшение $P_{\rm H}$ и изменение кинематических параметров УЗПД, может быть достигнуто применением тангенциальной схемы, и должно обеспечить выглаживающе-упрочняющий эффект на поверхности этих деталей, без увеличения волнистости поверхности. На основание этого можно предположить, что применение УЗПД по тангенциальной схеме наиболее рационально при обеспечении требуемого состояния поверхностного слоя деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов.

Управление геометрическим и физико-механическим состоянием поверхностного слоя изделий при обработке не может быть достигнуто без знания параметров следов обработки и их взаимного расположения.

2.2 Расположение следов обработки после УЗПД по тангенциальной схеме

Состояние поверхностного слоя после применения ультразвукового поверхностного пластического деформирования по тангенциальной схеме будет зависеть от траектории движения инструмента, силовых параметров процесса и исходного состояния ПС.

Значительное влияние на итоговое состояние поверхности после УЗПД оказывает взаимное движение рабочего инструмента и обрабатываемой детали. Стоит также отметить, что понимание этих закономерностей необходимо для прогнозирования формируемого состояния ПС.

Чтобы определить расположение следов обработки на поверхности необходимо знать вид траектории движения инструмента, характер взаимного расположения этих траекторий и ширину следа (коридора, ширина которого равна перемещению инструмента за один период колебаний, вдоль оси подачи).

Для описания траектории перемещения инструмента примем, что при обработке имеет место точечный контакт инструмента с поверхностью детали, а реальная ширина очага деформирования будет симметрично расположена относительно этого следа.

Перемещение инструмента относительно поверхности детали в декартовой системе координат *ZOX* описывается системой уравнений [3, 4].

$$\begin{cases}
Z = V_S t + A \sin(2\pi f t) \sin \beta \\
X = V_V t + A \sin(2\pi f t) \cos \beta
\end{cases}$$
(2.17)

Графическое представление системы уравнений (2.17) приведено на рисунке 2.8.

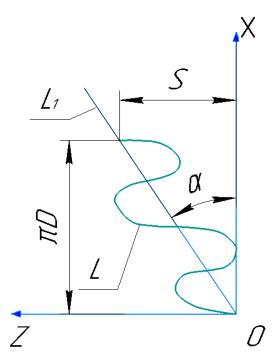


Рисунок 2.8 — Траектория перемещения деформатора при УЗПД по тангенциальной схеме: L — траектория следа, L_1 — средняя линия следа, α — угол наклона средней линии траектории следа, D — диаметр детали, S — подача инструмента (мм/об)

Как видно из рисунка 2.8 на поверхности детали формируется след в виде синусоиды. Средняя линия которой описывается системой уравнений:

$$\begin{cases}
Z_{L1} = V_S t \\
X_{L1} = V_V t
\end{cases}$$
(2.18)

Положение средней линии характеризуется наклоном под углом α к оси X, величина которого определяется:

$$tg\alpha = \frac{S}{\pi D_1} \tag{2.19}$$

$$\alpha = arctg \frac{S}{\pi D_1} \tag{2.20}$$

При обработке цилиндрических деталей на поверхности будет формироваться сетка из следов, расположение которых, относительно друг друга будет определяться технологическими параметрами обработки.

Так как микрогеометрия поверхности существенно зависит от формы остаточных следов и характера их взаимного расположения, то необходимо

знать факторы, влияющие на положение траектории после каждого оборота детали.

Для описания расположения следов обработки использована развертка цилиндрической поверхности и множество плоских систем координат, расположение которых подчиняется следующей закономерности — направление всех осей ординат совпадает с направлением $\overline{V_V}$, а осей абсцисс с направлением вектора скорости подачи (рисунок 2.9). Начала координат выбранных систем располагаются в точках $O_1, O_2, O_3, \dots O_N$ которые имеют следующие координаты (0,0); (S,0); (2S,0); ... (N-1)S,0, то есть они получены путём параллельного сдвига начальной системы координат (0,0) на величину, кратную S. Формирование следа в каждой системе координат будет осуществляться за время (0...60/n) секунд, т.е. за один оборот детали.

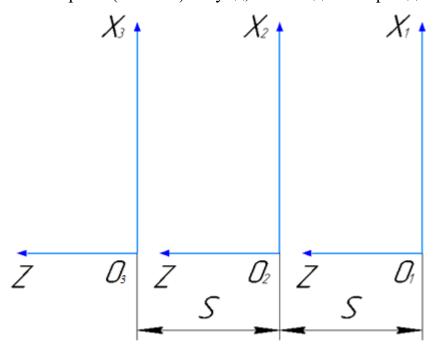


Рисунок 2.9 – Построение дополнительных систем координат

В общем случае начало следа, оставляемого инструментом на поверхности детали при втором обороте, будет иметь фазовый сдвиг φ относительно начала своей системы координат (рисунок 2.10). Это связано с тем, что за один оборот детали может укладываться не целое число периодов колебаний:

$$M + m = \frac{60f}{n} \tag{2.21}$$

где M, m — целое и соответственно дробное часть периодов колебаний, имеющих место за один оборот детали.

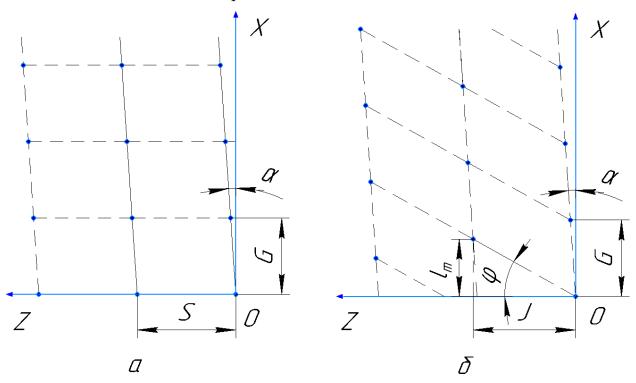


Рисунок 2.10 — Расположение соседних точек в зависимости от значения угла

$$\varphi$$
: a – φ = 0, δ – $\varphi \neq 0$

Величина фазового сдвига зависит от дробной части выражения (2.21).

Значения G и J будут равны:

$$G = \frac{60V_V}{f} \tag{2.22}$$

$$J = l_m t g \alpha + S \tag{2.23}$$

где $l_{\rm m}$ – длина, равная проекции синусоиды, пройденной за $(1-m)\cdot l$

С учётом вышесказанного траектории следа инструмента в принятых системах координат будут описываться системой уравнений:

$$\begin{cases}
Z_{i} = Sn(t + \frac{60}{n}(N_{i} - 1)) + A\sin(2\pi f(t + \frac{60}{n}(N_{i} - 1))\sin\beta \\
X_{i} = \pi Dnt + A\sin(2\pi f t)\cos\beta
\end{cases}$$
(2.24)

где N_i – номер оборота детали, 60/n – время одного оборота детали.

Данные уравнения позволяют описывать положение точки на траектории перемещения инструмента в любой момент времени.

Для анализа взаимного расположения траекторий, полученных при обработке, рассмотрим расположение характерных точек, соответствующих началам периода колебаний инструмента. Расположение данных точек на поверхности имеет закономерность, которую можно описать линейными (S, l) и угловыми (φ) параметрами сетки. Соседние точки располагаются в вершинах параллелограмма. Конфигурация сетки определяется значением угла φ (рисунок 2.10). При φ равном нулю положение соседних точек образует параллелограмм близкий по строению с прямоугольником (рисунок 2.10 - а)

Величина параметров сетки описывается уравнениями [3]:

$$l = \frac{V_V}{f} \tag{2.25}$$

$$\varphi = arctg \frac{G}{J} = arctg \frac{(1-m)l\cos\alpha}{S + (1-m)l\sin\alpha}$$
 (2.26)

где l — путь по средней линии проходимый деформатором за 1 период колебаний.

В наших условиях обработки максимальное значение угла $\varphi=0.714^\circ$ ($V_V=200$ м/с; f=66 кГц, S=0.05 мм/об), минимальное значение $\varphi=0.019^\circ$ ($V_V=10$ м/с; f=20 кГц, S=0.15 мм/об).

Взаимное расположение следов зависит от вариации угла φ (рисунок 2.11), величина которого определяется технологическими параметрами обработки: S, f, V_V, α .

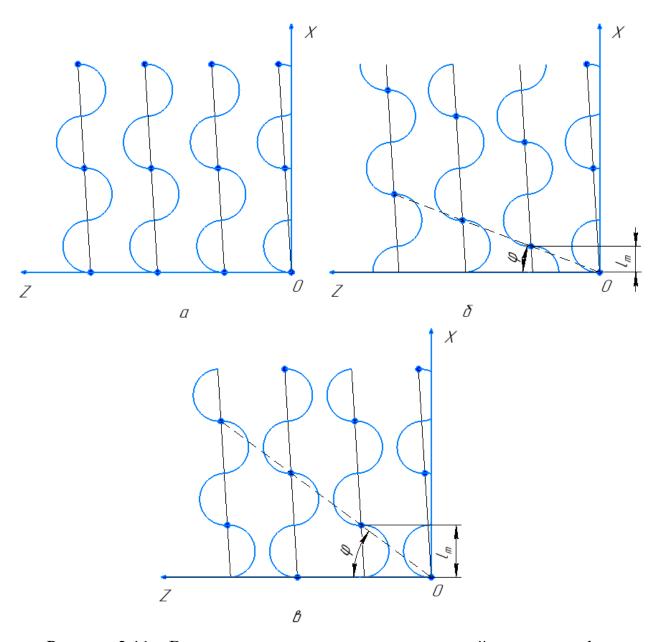


Рисунок 2.11 — Влияние значения m на величину линейного сдвига l_m и расположение сетки следов: а — m=0; б — m=0,25; в - m=0,5

Как видно (см. рис. 2.11), изменение значения φ сказывается на взаимном расположении характерных точек соседних следов обработки. При этом изменяется расстояние между соседними следами траекторий деформатора в направлении оси детали, что скажется на характере формируемой микрогеометрии. Так как в реальных условиях обработки имеется определённая ширина, оставляемая инструментом на поверхности детали, то изменение расстояния между соседними следами будет влиять на

их перекрытие, что в свою очередь обусловит изменение физикомеханического и микрогеометрического состояние поверхности.

Влияние значений параметров l, S на расположение характерных точек проиллюстрировано на рисунках 2.12, 2.13.

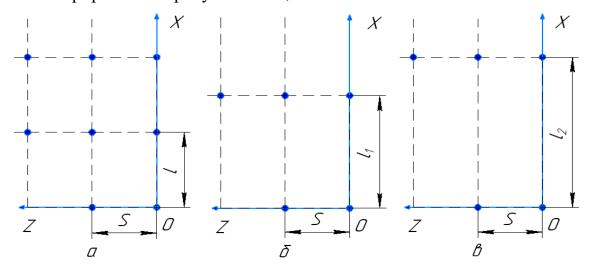


Рисунок 2.12 — Изменение расположения соседних характерных точек траектории при изменении скорости обработки (параметра l) ($S = {\rm const}$): a - l

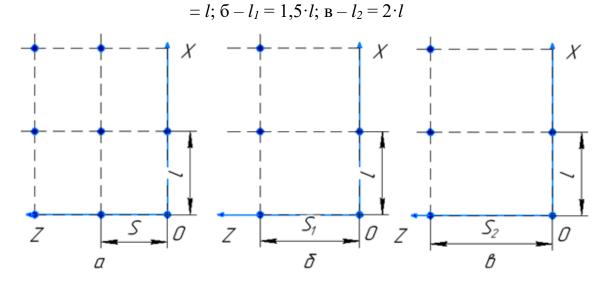


Рисунок 2.13 — Изменение расположения соседних характерных точек траектории при изменении параметра S обработки (l = const): a - S = S; $b - S_1 = 1.5 \cdot S$; $b - S_2 = 2 \cdot S$

Рассматриваемая схема УЗПД позволяет управлять характером следа при варьировании технологических параметров обработки, что существенно расширяет возможности данного метода. Варианты расположения следов обработки представлены на рисунках 2.14-2.18.

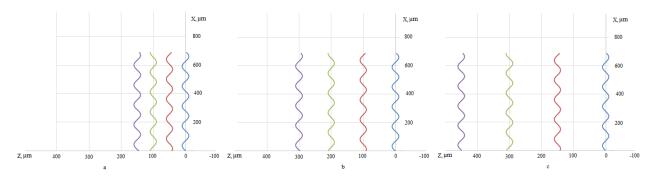


Рисунок 2.14 — Траектории расположения следов обработки в зависимости от изменения шага подачи *S*:

$$a-S=0,05$$
 мм/об; б $-S=0,1$ мм/об; в $-S=0,15$ мм/об ($f=20$ к Γ ц, $V_V=10$ м/мин, $\beta=\pi/2$, $A=10$ мкм)

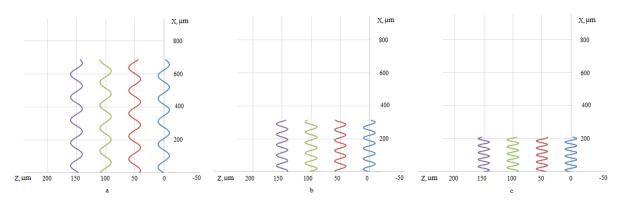


Рисунок 2.15 — Траектории расположения следов обработки в зависимости от изменения частоты f:

$$a-f=20$$
 к Γ ц; б $-f=44$ к Γ ц; в $-f=66$ к Γ ц ($S=0,05$ мм/об, $V_V=10$ м/мин, $\beta=\pi/2, A=10$ мкм)

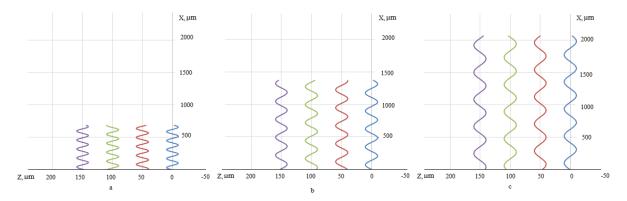


Рисунок 2.16 — Траектории расположения следов обработки в зависимости от изменения скорости V_V :

$${
m a}-V_V=10$$
 м/мин; б — $V_V=100$ м/мин; в — $V_V=200$ м/мин ($S=0,05$ мм/об, $f=20$ кГц, $\beta=\pi/2$, $A=10$ мкм)

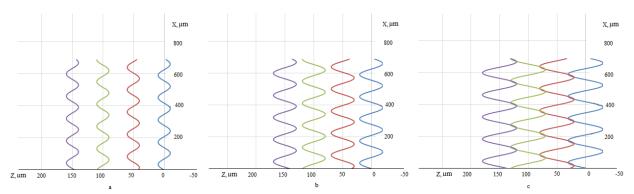


Рисунок 2.17 — Траектории расположения следов обработки в зависимости от изменения амплитуды A:

$$a-A=10$$
 мкм; б $-A=20$ мкм; в $-A=30$ мкм ($V_V=10$ м/мин, $S=0{,}05$ мм/об,
$$f=20$$
 к Γ ц, $\beta=\pi/2$)

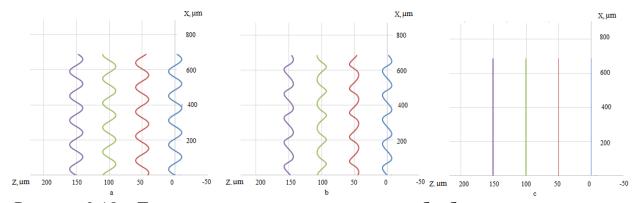


Рисунок 2.18 — Траектории расположения следов обработки в зависимости от изменения угла ввода колебаний β :

$$a-\beta=\pi/2,\, \delta-\beta=\pi/4,\, B-\beta=0$$
 ($S=0,05\,$ мм/об, $V_V=10\,$ м/мин, $f=20\,$ к Γ ц, $A=10\,$ мкм)

Также из графиков видно, что ширина коридора траектории изменяется от 0 до 2A, в который вписывается траектория движения центра деформатора.

Подтверждение влияния угла β на ширину оставляемого следа приведено на рисунке 2.19. Из представленных топограмм видно, что изменение угла ввода колебаний приводит к увеличению ширины следа, оставляемого инструментом. Заметно, что с увеличением ширины следа наблюдается более планомерное распределение материала по поверхности после деформирования.

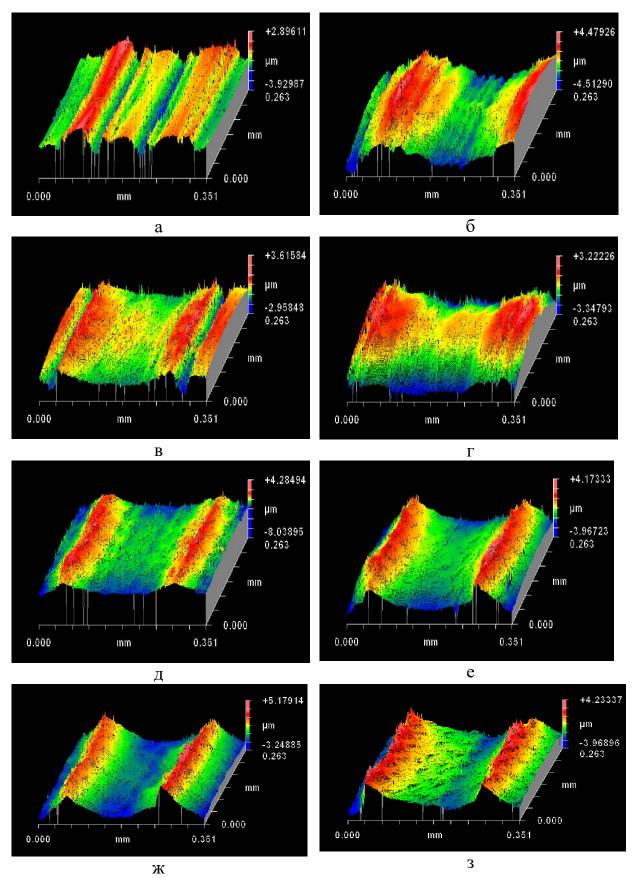


Рисунок 2.19 — Влияние β на ширину следа (АРМКО, $P_{\rm CT}=80$ H, S=0,3 мм/об, V=62,8 м/мин): а — АВ; б — УЗПД $\beta=0^\circ$; в — УЗПД $\beta=15^\circ$; г — УЗПД $\beta=30^\circ$; д — УЗПД $\beta=45^\circ$; е — УЗПД $\beta=60^\circ$; ж — УЗПД $\beta=75^\circ$; з — УЗПД $\beta=90^\circ$

Чтобы оценить итоговое состояние поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме используем траектории следов и зададимся их шириной. Диаметр отпечатка будет определяться отношением силы нагружения и твёрдостью обрабатываемого материала, что и будет характеризовать ширину следа. В этом случае изменение параметров ультразвуковой обработки приводит к различному рельефу, формируемому на деформируемой поверхности. Ширина коридора следа в направлении подачи за период колебаний описывается выражением:

$$K = b_1 + 2A\sin\beta \tag{2.28}$$

где b_1 – ширина следа.

В процессе УЗПД возможно формирование частичного и полностью нового рельефа на обрабатываемой поверхности. Первый вариант достигается при условии, когда ширина коридора следа меньше подачи (K/S < 1). В этом случае на поверхности формируется сетка из соседних следов с исходным профилем между ними (рисунок 2.20).

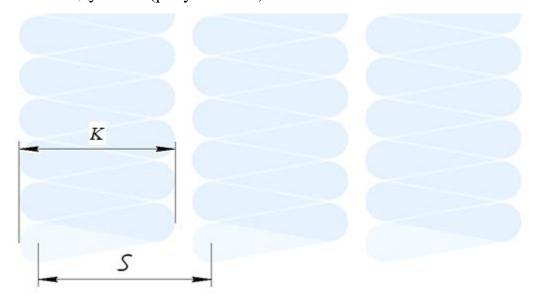


Рисунок 2.20 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме (K/S < 1)

Из приведённого рисунка видно, что следы перекрывают не всю поверхность, происходит частичная модификация микрогеометрии. Полностью новый профиль поверхности будет наблюдаться при условии K/S

 \geq 1. При этом формируемая микрогеометрия будет определяться не только соотношением K/S, но и значением дробной части периода m (рисунок 2.21-2.28).

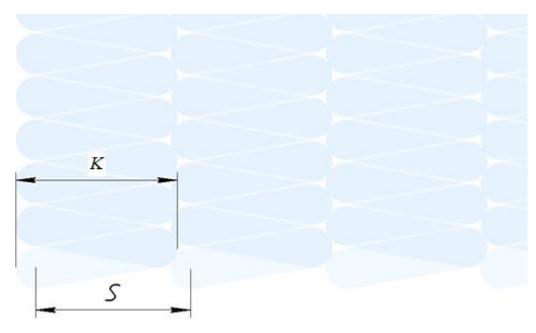


Рисунок 2.21 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме ($K/S=1,\,m=0$)

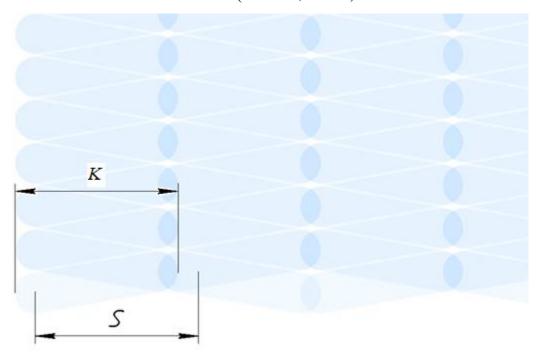


Рисунок 2.22 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме ($K/S=1,\,m=0.5$)

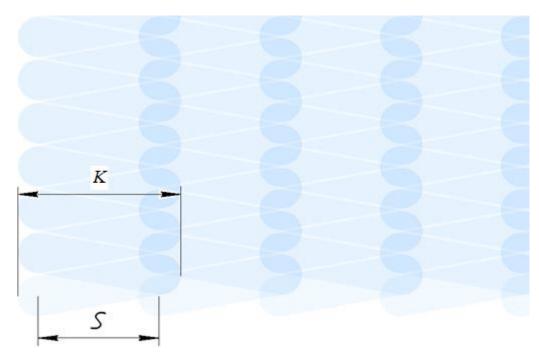


Рисунок 2.23 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме ($K/S > 1, K = 1,33 \ S, m = 0$)

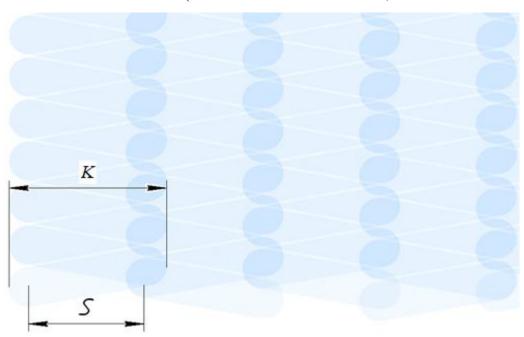


Рисунок 2.24 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме ($K/S > 1, K = 1,33 \ S, m = 0,5$)

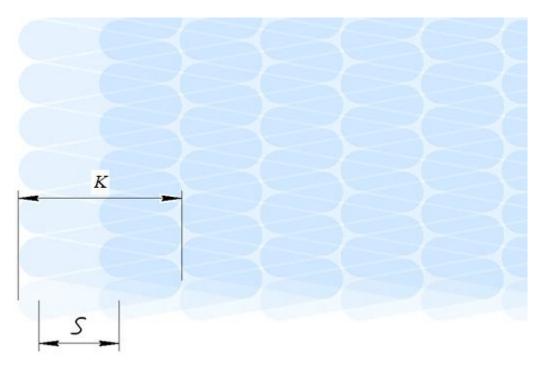


Рисунок 2.25 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме ($K/S > 1, K = 2 \ S, m = 0$)

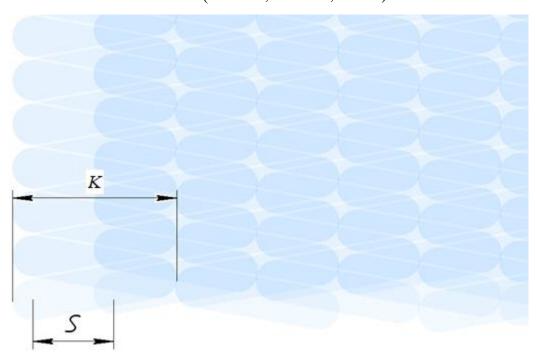


Рисунок 2.26 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме (K/S > 1, K = 2 S, m = 0,5)

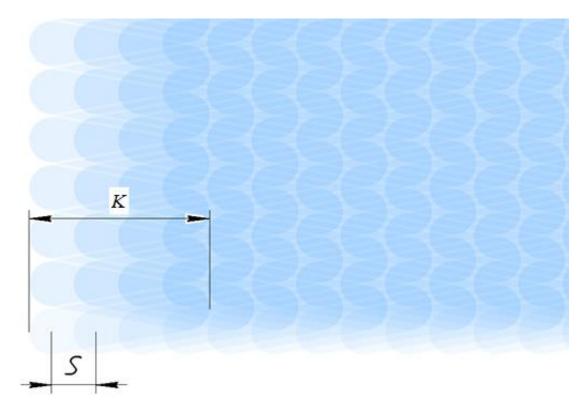


Рисунок 2.27 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме ($K/S > 1, K = 4 \ S, m = 0$)

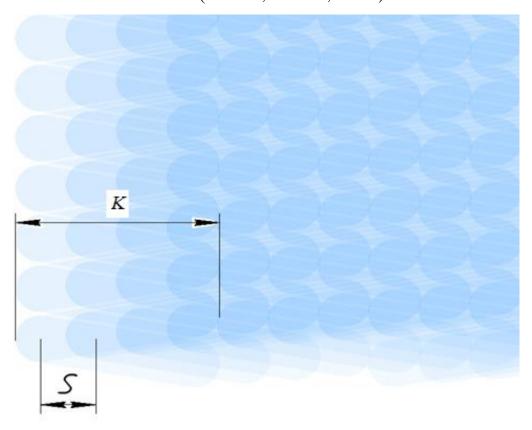


Рисунок 2.28 — Топография поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме (K/S > 1, K = 4 S, m = 0,5)

Полностью новый профиль обеспечивается перераспределением материала всей поверхности. Кроме того, от отношения ширины дорожки после одного прохода инструмента к подаче будет зависеть количество перекрытий, т.е. когда последующий след частично накладывается на предыдущий, на рисунках 2.22-2.28 эти области выделены тёмным цветом. Чем выше соотношение *K/S*, тем мельче ячейки формируемого профиля. Это обеспечивает более полное сглаживание исходных микронеровностей и формирование поверхности с более регулярным ячеистым строением. Такой характер поверхности не наблюдается при использовании других методов ППД. При этом значение параметра *m* также вносит вклад на формируемые элементы микрогеометрии.

Анализ полученной топографии поверхности позволяет рассчитать параметры шероховатости формируемой поверхности. При этом чтобы обеспечить формирование полностью нового микрорельефа необходимо, чтобы глубина отпечатка была больше полной высоты профиля исходной поверхности. В выбранном сечении измеряя расстояние между одноимёнными точками на поверхности можно определить параметры (Sm). Оценка максимальной высоты формируемого профиля будет равна расстоянию между выступами и впадинами соседних элементов поверхности (Rz) (рисунок 2.29).

Оценка значений параметров шероховатости для цилиндрических деталей традиционно осуществляется в направлении подачи (поперечное направление), так как они выше, чем в продольном.

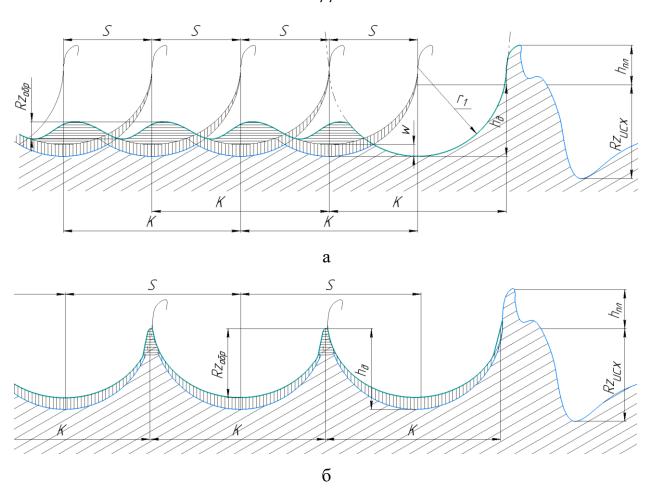


Рисунок 2.29 — Изменение параметров шероховатости в зависимости от степени наложения следов: а — K/S = 2, б — K/S = 1; K — ширина коридора следа, h_{∂} — глубина полного внедрения деформатора, S — подача инструмента, r_1 — радиус инструмента, w — глубина восстановления отпечатка, $h_{\text{пл}}$ — высота наплыва материала, $R_{Z_{\text{исх}}}$ — максимальная высота профиля исходной поверхности, $R_{Z_{\text{обр}}}$ — максимальная высота профиля после обработки,

Sm – средний шаг неровности по средней линии

Из рисунка 2.29 видно, что увеличение соотношения K/S сопровождается уменьшением как высотных (Rz), так и шаговых параметров (Sm) шероховатости поверхности. При этом при формировании полностью нового микрорельефа поверхности при УЗПД по тангенциальной схеме максимальная высота профиля меньше, чем глубина полного внедрения деформатора и зависит от соотношения степени перекрытия следов обработки. Определение максимальной высоты профиля после обработки можно

осуществить из геометрических соотношений величины подачи S и радиуса лунки отпечатка $R_{\rm H}$ используя выражение (рисунок 2.30):

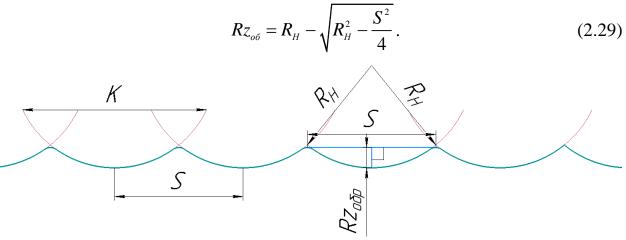


Рисунок 2.30 — Определение максимальной высоты профиля ($R_{Z_{0}\delta p}$) после УЗПД по тангенциальной схеме

Так как в процессе обработки материал распределяется не только сторону подачи, но и в противоположную ей, то итоговая высота профиля будет выше примерно на 20% для рассматриваемых материалов (данные получены из анализа профилограмм поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме).

$$Rz_{o\delta\rho} = Rz_{o\delta} + 0, 2 \cdot Rz_{o\delta}$$
 (2.30)

Шаговый параметр Sm при формировании полностью нового рельефа можно выразить как

$$Sm = S + A\sin\beta \tag{2.31}$$

Изучение кинематических параметров УЗПД по тангенциальной схеме закономерности перемещения позволило выявить инструмента поверхности детали и возможные варианты вида следов и их взаимного расположения, определять итоговые высотные (Rz) и шаговые (Sm) параметры Полученные шероховатости поверхности. знания дают возможность управлять характером перемещения инструмента и тем самым формировать различную микрогеометрию поверхности и назначать технологические параметры обработки.

2.3 Параметры очага деформирования

Силовые параметры процесса УЗПД существенно влияют на итоговое состояние поверхности. Под силовыми параметрами понимается совокупность сил, воздействующих на обрабатываемую поверхность. Для того, чтобы достоверно определить их влияние на итоговое состояние ПС произведём их подробный анализ.

Начальной стадией процесса УЗПД является нагружение поверхности деформатором со статической силой $P_{\rm CT}$, приводящее к пластической деформации поверхностного слоя (рисунок 2.31). При этом на поверхности образуется лунка от инструмента, геометрические параметры которой зависят от силовых параметров обработки (нагрузки), свойств обрабатываемого материала, размеров и формы контактирующих тел.

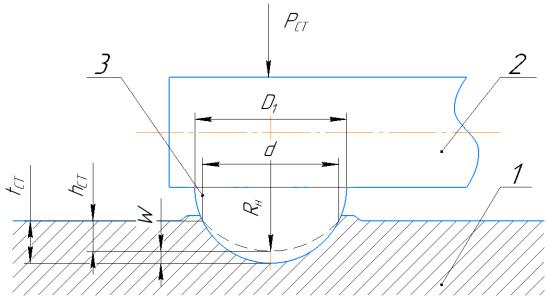


Рисунок 2.31 — Параметры очага деформирования при статическом нагружении: 1 — обрабатываемая деталь; 2 — волновод; 3 — деформатора, t_{CT} — глубина абсолютного вдавливания, h_{CT} — глубина восстановленного отпечатка, w — глубина восстановления отпечатка, P_{CT} — сила вдавливания,

 R_H - радиус лунки отпечатка

Согласно автору [39] зависимость между $P_{\rm CT}$ и глубиной восстановленного отпечатка h можно определить

$$h_{CT} = t_{CT} - w (2.32)$$

Определение глубины абсолютного вдавливания [39]

$$t_{CT} = \frac{1}{2} \left(D_1 - \sqrt{D_1^2 - d^2} \right) \tag{2.33}$$

где D_I – диаметр деформатора, d – диметр отпечатка.

Оценка величины упругого восстановления является частным случаем задачи Герца, которую можно определить [1]

$$W = 1,77k_1 \sqrt[3]{\frac{P_{CT}^2}{R_H(k_1 + k_2)}}$$
 (2.34)

где

$$k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1} \tag{2.35}$$

$$k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2} \tag{2.36}$$

 μ_1 , μ_2 , E_1 , E_2 — коэффициенты Пуассона и Юнга материалов детали и деформатора.

Для вычисления глубины отпечатка, воспользуемся формулой вычисления твёрдости металлов и сплавов по Бринеллю [39]

$$HB = \frac{2P_{CT}}{\pi D_1 \left(D_1 - \sqrt{D_1^2 - d^2} \right)}$$
 (2.37)

где $P_{\rm CT}$ – сила вдавливания, D_I – диаметр деформатора, d – диаметр отпечатка.

Из формулы (2.37) путём математических преобразований выразим диаметр отпечатка d

$$d = \sqrt{2D_1 - \frac{2P_{CT}}{HB\pi D_1} \left(\frac{2P_{CT}}{HB\pi D_1}\right)}$$
 (2.38)

При этом площадь зоны контакта будет определяться выражением (см. рис. 2.31)

$$F = 2\pi r_1 (h_{CT} + w) = \pi D_1 t_{CT}$$
 (2.39)

Перечисленные выше формулы справедливы при статическом нагружении поверхности деформатором. Ввиду того, что в процессе УПЗД нагружение является динамическим, это сказывается и на параметрах отпечатка.

Установлено [67], что эффект упругого восстановления наблюдается и при скольжении деформатора по обрабатываемой поверхности. В этом случае схема состояния поверхности в процессе обработки будет выглядеть следующим образом (рисунок 2.32)

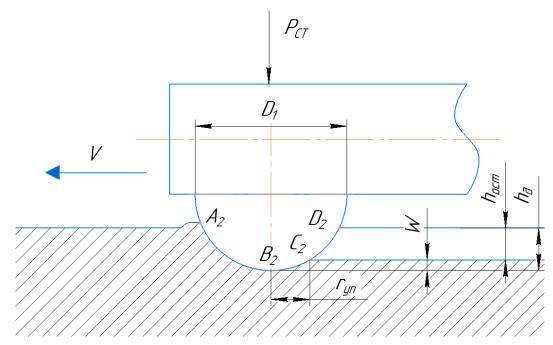


Рисунок 2.32 — Схема скольжения деформатора по образцу h_{∂} — полная глубина внедрения, h_{ocm} — остаточная глубина дорожки трения, w — величина упругого восстановления, $r_{\rm УП}$ — длина восстановленного участка

При скольжении деформатора по обрабатываемой поверхности остаточный след будет определяться не только зоной деформации A_2B_2 , но и зоной упругого восстановления B_2C_2 .

В этом случае абсолютная площадь контакта определяется как

$$F_A = \pi R_H r_1 + F_{VII} \tag{2.40}$$

где $F_{V\!\Pi}$ – площадь упругого восстановления.

Выразим $F_{V\!I\!I}$ как половину площади эллипса, полуосями которого является ширина дорожки $r_{O\!I\!I\!I} = \sqrt{2R_H h_{o\!c\!m}}$ и расстояние от вертикальной оси деформатора до точки C в продольном сечении дорожки трения $r_{V\!I\!I} = \sqrt{1,3R_H w}$

,
$$R_H = \frac{0.25d^2 + w^2}{w}$$
 [63].

Тогда

$$F_{VII} = \frac{1}{2} \pi r_{OTII} r_{VII} = 0.8 \pi R_H \sqrt{w h_{ocm}}$$
 (2.41)

Согласно данным, приведённым в работе Михина Н.М. [67] величина восстанавливаемого слоя при скольжении деформатора и площадь контакта восстанавливаемого слоя определяются

$$w = 1,3R_H^{\frac{1}{3}}h_{\delta}^{\frac{2}{3}} \left(\frac{HB}{E}\right)^{\frac{2}{3}} \left(1 - \mu^2\right)^{\frac{2}{3}}$$
 (2.42)

$$F_{VII} = 1.3R_H^{\frac{7}{6}} h_0^{\frac{5}{6}} \left(\frac{HB}{E}\right)^{\frac{1}{3}} \left(1 - \mu^2\right)^{\frac{1}{3}}$$
 (2.43)

где *µ* – коэффициент Пуассона

В этом случае площадь фактического касания произвольной микронеровности отлична от площади касания при идеально пластическом контакте на величину $F_{\rm УП}$ и равна [67]

$$A_{IIP} = \pi R_H h_0 \left[1 + 0.9 \left(\frac{R_H}{h_0} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{HB}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \left(1 - \mu^2 \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$
 (2.44)

Выражение (2.44) не учитывает влияние исходного микрогеометрического состояния контактируемых поверхностей.

В исследованиях И.В. Крагельского [54] и Н.Б. Демкина [36] принято считать функцию распределения микронеровностей по высоте непрерывной и дифференцируемой. С учётом этого была выведена формула для определения площади отпечатка с учётом исходного микрогеометрического состояния

поверхности (оценка основана на значениях показателя кривой опорной поверхности)

$$A_{IIP} = \frac{1}{2} A_C b \varepsilon_k^{\nu} \left[1 + 0.9 \nu (\nu - 1) k_2 \left(\frac{R_H}{h_o} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{HB}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \left(1 - \mu^2 \right)^{\frac{1}{3}} \varepsilon_k^{-\frac{1}{6}} \right]$$
(2.45)

обработки со снятием стружки $b = 0.5 \left(\frac{R \max}{Rp}\right)^v$, $v = \frac{Rp}{Ra} - 1$; ε — величина

отношения расстояния от вершины самой высокой неровности до рассматриваемого сечения к высоте самой высокой неровности.

В свою очередь $Ar_{\rm II}$ (фактическая площадь при скольжении) примерно равна $Ar_{\rm CT} = \frac{P_{\rm CT}}{HB}$ (фактической площади при статическом вдавливании) и будет определяться [67]:

$$Ar_{II} = Ar_{CT} \sqrt{1 + f_{TP}^{2}}$$
 (2.46)

Согласно данным [67] глубина полного внедрения деформатора при движении описывается выражением (контакт шероховатой поверхности с гладкой)

$$h_{o} = \left(2\sqrt{1 + f_{TP}^{2}}\right)^{\frac{1}{V}} t_{CT} \tag{2.47}$$

где f_{TP} – коэффициент трения, t_{CT} – величина полного внедрения при статике.

Определение коэффициента трения при вводе ультразвуковых колебаний в зону контакта рассмотрено в работе В. Л. Попова [83]. Его оценка основывается на законе сухого трения Кулона. При этом рассматривается два случая ввода колебаний относительно направлении скольжения — сонаправленно и перпендикулярно.

Так в случае с соноправленностью колебаний относительно направления скольжения макроскопическая сила трения P_{TP} ' зависит от соотношения колебательной скорости V_{K} и скорости главного движения обработки V_{V} . В случае, когда $V_{\mathrm{K}} < V_{V}$ средняя сила трения равна силе трения Кулона

$$P_{TP}' = 2\mu P_{CT} \tag{2.48}$$

а при $V_{\rm K} > V_{V}$

$$P_{TP}' = \frac{4\mu P_{CT}}{\pi} \arcsin\left(\frac{V_K}{V_V}\right) \tag{2.49}$$

при сонаправленном направлении колебания деформатора и главной скорости обработки

$$P_{TP}' = \begin{cases} \frac{4\mu P_{CT}}{\pi} \arcsin\left(\frac{V_K}{V_V}\right), & \text{при } V_V < V_K \\ 2\mu P_{CT}, & \text{при } V_V > V_K \end{cases}$$
 (2.50)

В свою очередь, при вводе колебаний перпендикулярно направлению скольжения макроскопическая сила описывается выражением [83]

$$P_{TP}' = \frac{\mu P_{CT}}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_{K}}{V_{V}} \cos \varphi\right)^{2}}}$$
(2.51)

Из анализа уравнений (2.20, 2.51) следует, что максимальное значение средней силы трения будет наблюдаться в случае, когда колебания сонаправлены направлению скольжения и выполняется условие $V_{\rm K} < V_{\rm V}$. При этом сила трения при УЗПД равна силе трения при выглаживании. В остальных случаях $P_{\rm TP}$ будет меньше.

Формулы (2.45) и (2.47) справедливы, относительно процесса алмазного выглаживания, когда процесс обработки сопровождается отсутствием колебаний деформатора с ультразвуковой частотой. На сегодняшний день установлено, что ввод УЗК в зону контакта приводит к уменьшению коэффициента трения [10, 62, 68, 79, 108]. На основании этих данных разумно

предположить, что в процессе УЗПД площадь отпечатка $A_{\Pi P}$ и глубина полного внедрения деформатора h_{∂} будет большей, чем при процессе AB.

Вероятным объяснением этого явления является то, что ввиду уменьшения силы трения большая часть прилагаемой нагрузки расходуется на деформирование обрабатываемой поверхности, приводящему к увеличению площади и глубины отпечатка на коэффициенты K_S и K_h (1,15 \leq $K_S \leq$ 1,34 и 1,13 \leq $K_h \leq$ 1,31) значения которых получены экспериментально. С учётом этого формулы (2.45) и (2.47) примут следующий вид:

$$A_{IIP} = \frac{1}{2} A_C b \varepsilon_k^{\nu} \left[1 + 0.9 \nu (\nu - 1) k_2 \left(\frac{R_H}{h_o} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{HB}{E} \right)^{\frac{1}{3}} (1 - \mu^2)^{\frac{1}{3}} \varepsilon_k^{-\frac{1}{6}} \right] K_S \quad (2.52)$$

$$h_{o} = \left(2\sqrt{1 + f_{CT}^{2}}\right)^{\frac{1}{\nu}} t_{CT} K_{h}$$
 (2.53)

Площадь контакта будет представлять состоять из двух частей, а именно половины окружности $Ar_{\rm Д}$ и половины площади эллипса (рисунок 2.33), и описывается уравнением (2.54).

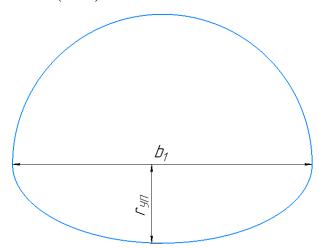


Рисунок 2.33 – Схема отпечатка на поверхности от воздействия деформатора

$$A_{IIP} = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{\pi b_1 r_{VII}}{4} \tag{2.54}$$

Из уравнения (2.54) можно выразить ширину следа b_1 , необходимую для моделирования топографического строения обработанной поверхности, путём решения квадратного уравнения (2.55) (если при решении уравнения имеются 2 корня, то выбираем наибольший положительный):

$$b_1^2 + 2r_{yy}b_1 - \frac{8A_{yy}}{\pi} = 0 ag{2.55}$$

2.4 Модель формирования топографии поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме

Полученные закономерности геометрических параметров следа обработки, кинематических и силовых параметров процесса УЗПД по тангенциальной схеме позволили сформировать модель топографии поверхности, алгоритм которой приведен на рисунке 2.34.

Последовательность моделирования:

- 1. Определить исходные параметры поверхности и геометрии детали.
- 2. Назначить требуемое состояние поверхности по параметрам Ra, Rz, Sm.
- 3. При формировании полностью нового микрорельефа ($h_{\partial} \geq Rz_{\text{UCX}}$) принять $h_{\partial} = Rz_{\text{UCX}}$. Преобразовать формулу (2.47) и рассчитать t_{CT} . Из формулы (2.33) выразить и рассчитать диаметр отпечатка d, и из формулы (2.37) определить P_{CT} .
 - 4. Рассчитать $A_{\Pi P}$ по формуле (2.52) и по формуле (2.55) найти b_1 .
- 5. Назначить параметры A, β и рассчитать K по формуле (2.28). Рекомендуется принять $\beta = 0^{\circ}$, 60° или 90° .
 - 6. Рассчитать подачу инструмента S по формуле (2.29).
- 7. Для максимальной производительности рекомендуется назначить наибольшую скорость главного движения V_V и стойкости инструмента (30 250 м/мин).
- 8. Определить дробную часть периодов колебаний m имеющих место за один оборот детали по формуле (2.21).
- 9. С учётом ширины следа смоделировать графически топографическое строение поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме используя систему уравнений (2.24).
- 10. Определить шаговые параметры шероховатости поверхности и количество ячеек профиля на единицу площади.

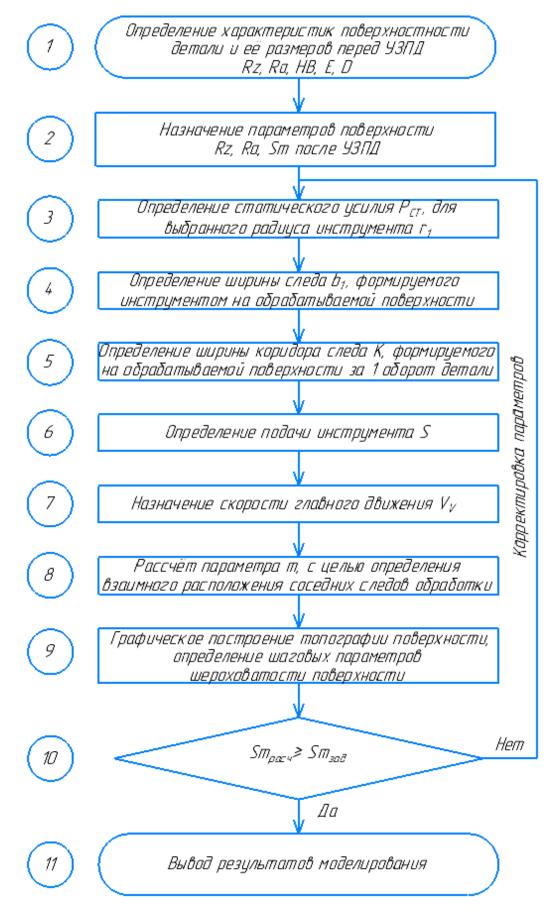


Рисунок 2.34— Последовательность моделирования топографии УЗПД по тангенциальной схеме

11. При выполнении условия $Sm_{\text{расч}} \ge Sm_{\text{зад}}$ перейти к выводу результатов, иначе провести перерасчёт с пункта 3, изменив параметры обработки.

12. Вывести результаты моделирования.

Использование модели топографии поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме и реальная поверхность образца из меди М1 приведены на рисунке 2.35. Исходные данные: $P_{\rm CT}=60$ H, n=400 об/мин, S=0,1 мм/об, A=12 мкм, f=20 кГц, $r_1=4$ мм, D=65 мм, твёрдость HB55, $\beta=60^\circ, E=118\cdot10^3$ МПа.

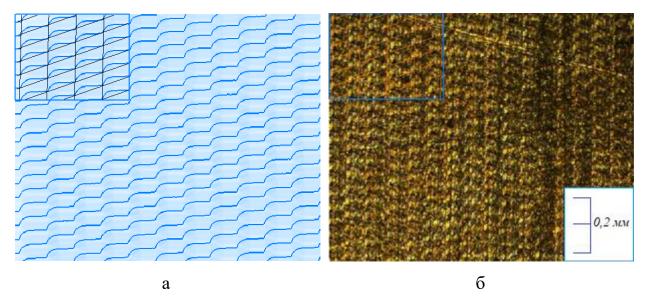


Рисунок 2.35 – Топография поверхности: а – результат моделирования; б – после обработки УЗПД по тангенциальной схеме

Из анализа рисунка 2.35 видно, что моделированное состояние поверхности схоже с топографией после УЗПД по тангенциальной схеме. При это наблюдается высокая сходимость расчётных и действительных параметров поверхности: высотные параметры, шаговые параметры, количество ячеек профиля: результат моделирования — 147 на 1 мм^2 , реальный профиль — 158 на мм^2 (разница менее 10%), и их количество можно рассчитать

$$N_{_{gu}} = \frac{f}{S \cdot V_{_{V}}} \tag{2.56}$$

Выводы по 2 главе

- 1. Показано, что при УЗПД по рассмотренным схемам отсутствует стационарность состояния в очаге деформирования в силу переменного характера вектора результирующей скорости обработки. Однако при УЗПД по тангенциальной схеме вектор результирующей скорости всегда расположен в плоскости касательной к обрабатываемой поверхности, что обеспечивает непрерывный контакт инструмента с поверхностью детали, отсутствие значительного динамического воздействия в направлении по нормали к поверхности, что позволяет формировать поверхностный слой с различным сочетанием выглаживающего и упрочняющего эффектов при дозированном значении нормальной составляющей силового воздействия, что обуславливает рациональность применения данной схемы ультразвукового поверхностного пластического деформирования для деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов.
- 2. Предложено математическое описание траектории перемещения инструмента в процессе УЗПД по тангенциальной схеме в виде системы уравнений, учитывающих смещение соседних следов воздействия инструмента на развёртке обрабатываемой поверхности, обусловленного не кратностью времени одного оборота детали к периоду УЗК. Решение предложенной системы уравнений позволило установить закономерности формирования траектории движения инструмента на поверхности детали, с учётом влияния технологических параметров обработки, в исследуемом диапазоне режимов.
- 3. Предложено использовать параметр равный отношению ширины коридора следа обработки в направлении подачи инструмента (K) к её величине (S), для установления условий формирования частичного (K/S < 1) или полностью нового ($K/S \ge 1$) микрорельефа обрабатываемой поверхности в процессе УЗПД по тангенциальной схеме.

- 4. Установлено, что угол β угол между векторами скорости колебательного движения и скорости главного движения является важным технологическим параметром при УЗПД по тангенциальной схеме, позволяющим изменять форму траектории движения инструмента и ширину коридора следа обработки (увеличение вплоть до величины равной удвоенному значению амплитуды колебаний), а также влиять на степень перекрытия следов обработки в процессе формирования микрогеометрии поверхности.
- 5. Введены эмпирические коэффициенты (K_S , K_h) позволяющие адаптировать полученные авторами Н.Б. Демкиным и Н.М. Михиным известные уравнения площади отпечатка и его глубины для описания процесса формирования параметров очага деформирования при УЗПД по тангенциальной схеме.
- 6. Разработана математическая модель формирования топографии поверхности при УЗПД тангенциальной ПО схеме, учитывающая геометрические параметры следа обработки, выявленные кинематические и закономерности формировании поверхностного силовые при технологические параметры позволяющая назначать ультразвукового поверхностного пластического деформирования в зависимости от требуемого итогового микрогеометрического состояния поверхности (Ra, Rz, Sm).

ГЛАВА З ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения теоретических исследований, описанных в предыдущей главе, необходимо проведение экспериментальных работ по применению УЗПД по тангенциальной схеме и определение его влияния на состояние обработанной поверхности. Ввиду этого данная глава посвящена разработке технологического обеспечения, выбору исследуемого материала, подготовке образцов, определению методик проведения экспериментальных исследований и их реализации.

3.1 Технологическое обеспечение ультразвуковой обработки

Для проведения УЗПД требуется соответствующее оборудование и оснастка. Ниже подробнее рассмотрим рабочие элементы, необходимые для реализации данной обработки.

Приспособление для реализации УЗПД по тангенциальной схеме

Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование по тангенциальной схеме проводилось на установке, выполненной на базе токарно-винторезного станка, оснащённого специальным приспособлением для установки инструмента, генератором УЗК и магнитострикционной головкой. Колебания деформирующего инструмента задавались ультразвуковым генератором и магнитострикционным преобразователем. Обработка проводилась на цилиндрических и плоских деталях на различных технологических режимах.

Для реализации схемы с вводом колебаний по тангенциальной схеме была спроектирована специальное приспособление, общий вид которого представлен на рисунках 3.1, 3.2.

Оно состоит из основания 1, кронштейна 2, подвижной плиты 3 с опорами 5, поворотного фланца 4, на который крепится магнитострикционная головка 6. Данная конструкция позволяет поворачивать головку относительно оси I-I, и создавать статическое прижатие деформатора 13 к обрабатываемой

поверхности с помощью системы нагружения 11, обеспечивающей постоянство контакта рабочего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали.

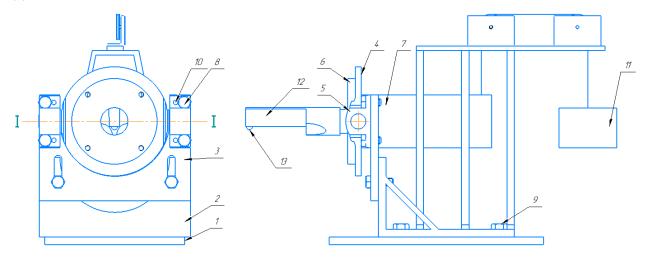


Рисунок 3.1 — Схема приспособления для ввода ультразвуковых колебаний по тангенциальной схеме: 1 — основание; 2 — кронштейн; 3 — плита регулируемая; 4 — фланец поворотный; 5 — опоры;

6 – магнитострикционная головка; 7 – кожух; 8–9 – болты; 10 – штифты;

11 — система нагружения; 12 — волновод; 13 — деформатор

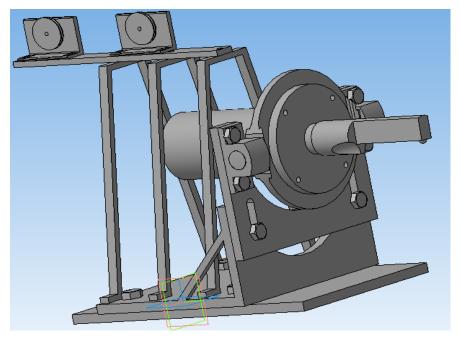


Рисунок 3.2 – Приспособление для ввода ультразвуковых колебаний по тангенциальной схеме

Применение данной установки обеспечивает колебание инструмента по касательной к обрабатываемой поверхности (рисунок 3.3).

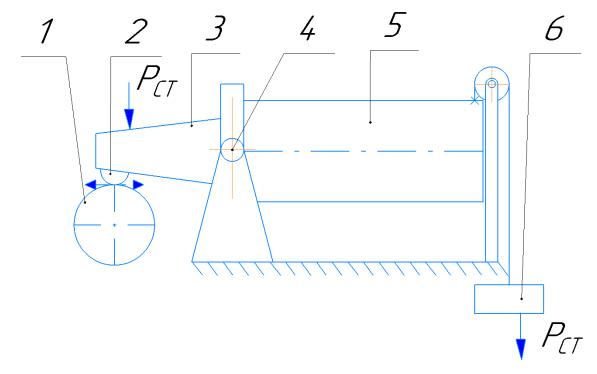


Рисунок 3.3 — Схема обработки для УЗПД по тангенциальной схеме 1 — обрабатываемая деталь, 2 — деформатор, 3 — волновод, 4 — ось качания, 5 — магнитострикционный преобразователь, 6 — груз, $P_{\rm CT}$ — статическая нагрузка

Установка предназначена для обработки цилиндрических поверхностей различного диаметра и монтировалась на суппорте токарно-винторезного станка 250ИТВМ.01 (рисунок 3.4). Основание, кронштейн, обе плиты и система нагружения были выполнены из стали, опоры поворотной плиты изготовлены из капролона. Приспособление позволяет регулировать высоту расположения оси волноводной системы, за счёт изменения взаимного расположения регулируемой плиты (рисунок 3.4, поз. а) и кронштейна (рисунок 3.4, поз. б) с последующей фиксацией последнего болтами (рисунок 3.4, поз. в). Также в конструкции предусмотрен поворот оси головки относительно опор, смонтированных на регулируемой плите. Вращение головки происходит за счёт гравитационных сил — груза, который подвешивается через систему тросов и блоков к корпусу ультразвуковой головки (рисунок 3.4, поз. г).



Рисунок 3.4 – Установка для УЗПД по тангенциальной схеме на базе токарного станка 250 ИТВМ: а – регулируемая плита; б – кронштейн; в – болты; г – система нагружения; д – система шлангов; е – суппорт станка, ж – генератор УЗК

Конструкция позволяет поворачивать ось волноводной системы по отношению к оси шпинделя станка, благодаря чему изменяется направление ввода колебаний по отношению к образующей цилиндрической поверхности обрабатываемой детали.

Магнитострикционная головка охлаждалась водой, подвод и отвод которой осуществлялся с помощью шлангов (рисунок 3.4, поз. д). Питание электромагнитного преобразователя (магнитострикционной головки) осуществлялось от генератора ультразвуковых колебаний ИЛ10-1.0 (рисунок 3.4, поз. ж). Приспособление в сборе устанавливалось и фиксировалось болтами на суппорте токарного станка (рисунок 3.4, поз. е).

Приспособление предусматривает регулировку положения волноводной системы относительно оси шпинделя с учётом диаметра обрабатываемой

детали. Выставление положения высоты головки на определённую высоту осуществляется путём смещения регулировочной плиты в вертикальной плоскости. Это достигается подъёмом или опусканием (в зависимости от параметров обрабатываемой детали) регулировочной плиты, с дальнейшей фиксацией её рабочего положения. Обеспечение исходного равновесия волноводной системы (рисунок 3.5, поз. а) относительно оси вращения производится за счёт компенсации веса ультразвуковой головки с системой охлаждения, путём подбора грузов (рисунок 3.5, поз. б) на платформу (≈ 2,5 Дальнейшее увеличение веса грузов создаёт полезную нагрузку, кг.). обрабатываемой К детали. Перед работ прикладываемую началом производилась настройка давления в системе охлаждения, подбирались параметры деформатора и выходная мощность ультразвукового генератора. Также осуществлялась настройка необходимых числа оборотов шпинделя станка и величины подачи суппорта.



Рисунок 3.5 – Установка для УЗПД по тангенциальной схеме на суппорте станка 250ИТВМ: а – исходное состояние волноводной системы;

б – установка грузов на платформу

Обработка плоских поверхностей проводилась на установке, представленной на рисунке 3.6. Данная установка представляет собой стол с резьбовыми отверстиями для закрепления обрабатываемой детали, имеющий два взаимоперпендикулярных перемещения, обеспечиваемых от автономных приводов.

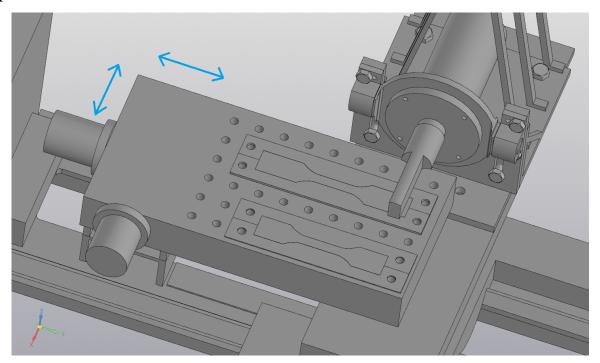


Рисунок 3.6 – Установка для УЗПД по касательной схеме плоскостных деталей

Подготовка волноводов и деформаторов

Для реализации УЗПД по тангенциальной схеме были изготовлены волноводы-концентраторы из титанового сплава ВТ-1 и стали 45. Геометрия волноводов была различной, с целью обеспечения различных коэффициентов усиления амплитуды колебаний.

Цилиндрический волновод изготавливался (рисунок 3.7) путём отрезки от прутка, длиной L=132.5 мм, которая рассчитывалась по формуле 3.1 [61]

$$L = 0.5 \cdot c \cdot T = \frac{c}{2f} \tag{3.1}$$

где c — скорость распространения продольных волн в материале (титан = 5020 м/с), f — частота (21000 Γ ц), T — период колебаний.

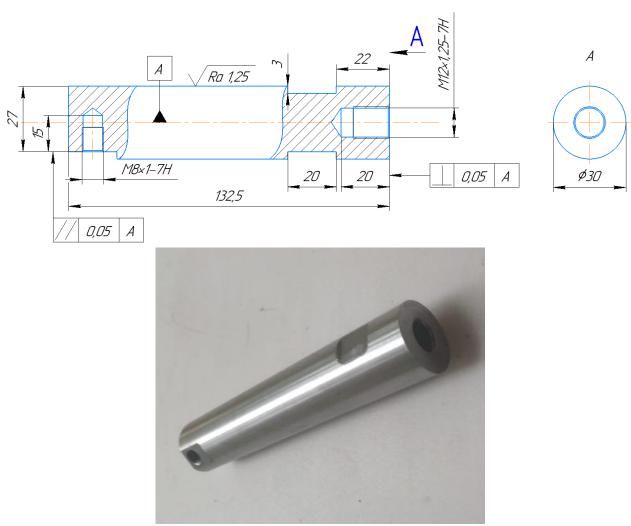


Рисунок 3.7 – Цилиндрический волновод

С обратной стороны сверлилось отверстие, с последующей нарезкой резьбы с мелким шагом под шпильку, посредством которой волновод присоединялся к магнитострикционной головке. На другом конце фрезеровалась площадка для изготовления отверстия с резьбой для крепления деформатора. Для обеспечения лучшего соприкосновения соединяемых элементов производилось их смазывание.

Конический волновод изготавливался для реализации бо́льшей амплитуды колебаний (рисунок 3.8). Длина концентратора $L=126,5\,$ мм, коэффициент усиления $N_{\rm V}=2,8\,$ [61].

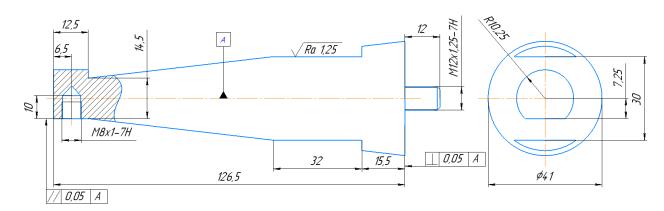


Рисунок 3.8 – Конический волновод

Для реализации высоких значений амплитуды колебаний инструмента и увеличения производительности при УЗПД были подготовлены деформаторы из синтетических алмазов типа АСПК и твёрдого сплава ВК8.

Деформаторы изготавливались сменными с резьбовой присоединительной частью.

Формирование радиуса рабочего элемента твердосплавных деформаторов достигалось следующим образом — шлифование на точильно-шлифовальном станке с последующей полировкой алмазными пастами. Общий вид деформаторов приведён на рисунках 3.9-3.10.

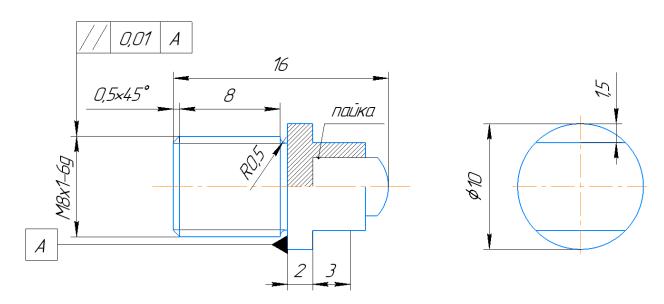


Рисунок 3.9 – Деформатор (чертёж)





... Рисунок 3.10 – Деформаторы:

а – твёрдый сплав, б – алмаз синтетический поликристаллический

3.2 Выбор обрабатываемых материалов и формы образцов

При выборе материала образцов руководствовались их физикомеханическими свойствами. Для проверки возможности формирования стабильного микрогеометрического состояния и упрочняющего эффекта на поверхности образцов, выполненных из пластичных материалов, методом УЗПД по тангенциальной схеме, без образования на поверхности волн текучести, были выбраны широко используемые материалы различной твёрдости — Д16 (НВ31), Д16Т (НВ65), Л68 (НВ150). Для оценки влияния УЗПД на металлографическую структуру деформированного слоя был выбран модельный материал — электротехническая сталь 10895 (АРМКО железо, НВ125 (укладывается в исследуемый диапазон). Данный материал на 99% состоит из *Fe*, что облегчает его анализ при металлографических исследованиях.

Поскольку большинство рабочих поверхностей деталей машин являются поверхностями вращения, то образцы были выполнены в форме цилиндров диаметром 40...50 мм.

Для чистоты эксперимента обрабатываемые образцы изготавливались из единого прутка (для каждого материала) с диаметрами 45...55 мм. Маркировка осуществлялась на торцевой поверхности. Перед обработкой

образцы обтачивались с целью исключения биения, и формирования одинаковых исходных микрогеометрических параметров поверхности (Ra, R_Z , Sm, t_p). Для определения параметров следа, формируемого при единичном проходе инструмента, образцы полировались до значений Ra = 0,1...0,3 мкм, $R_Z = 0,4...0,9$ мкм, Sm = 30...50 мкм, $t_p = 93...99$ %.

Образцы для оценки глубины, величины и знака остаточных напряжений вырезались из обработанных деталей на проволочно-вырезном электроискровом станке *Sodick AG*400*L*, что минимизировано влияние резания на итоговое состояние исследуемых материалов. Образцы представляли собой закрученные стержни толщиной 3 мм и радиусом 40...50 мм.

Образцы для оценки усталостных свойств выполнялись в форме пластин с утончённым сечением в центре образца. Переход между сечениями осуществляется по галтели, с целью исключения влияния концентраторов напряжения на результаты исследований.

Для триботехнических испытаний подготавливались дисковые образцы из латунного сплава Л68 диаметром 45 мм и толщиной 12 мм, которые отрезались от обработанного цилиндрического образца на проволочновырезном станке *Sodick AG*400*L*. Форма контртел – колодка с внутренним диаметром 45 мм и шириной 10 мм из стали 45.

С целью подтверждения достоверности полученных результатов и их допустимых границ проводилась статистическая обработка результатов прямых многократных равноточных измерений, описанная в приложении A, П1.

Состав и исходная металлографическая структура образцов

Химический состав исследуемых материалов подтверждался на оптическом эмиссионном спектрометре *ARL 3460 Quantris*. Анализ подтвердил соответствие элементного состава всех сплавов заявленному. Протокол исследования приведён на рисунке 3.11.

```
Анал C Mn Si P S Ni Cr Cu Mo V Ti Al
Cpm 0.09479 0.13172 0.20432 0.00689 0.04049 0.12794 0.03450 0.23010 0.00651 0.00011 0.00049 0.00347
Sd 0.00588 0.00064 0.00222 0.00023 0.00075 0.00066 0.00010 0.00184 0.00011 0.00007 0.00007 0.00030
Sd% 6.20286 0.48799 1.08739 3.26917 1.84955 0.51880 0.28810 0.80164 1.68903 58.27035 13.58806 8.56068

Nb W As Sn Co Pb B Sb Ta Zr Bi
Cpm (-0.00152 0.00218 0.01139 0.01233 0.01359 -0.00033 (-0.00049 0.00208 0.01355 (-0.00059 0.00452
Sd 0.00017 0.00065 0.00014 0.00016 0.00005 0.00048 0.00050 0.00030 0.00054 0.00008 0.00030
Sd% -10.92259 29.92633 1.22040 1.32566 0.35163 -147.92264 -9.81511 1.46205 3.99189 -14.18870 6.70091

Ca Mg Zn Ce La N Te FE%
Cpm 0.00065 0.00221 0.00048 0.00028 (-0.00072 (-0.00850 0.00011 99.0675
Sd 0.00011 0.00002 0.00003 0.00007 0.00008 0.00899 0.00005 0.0119
Sd% 17.65582 1.01030 7.28606 24.03230 -11.84211 -105.79487 44.12536 0.0120
```

Рисунок 3.11 – Химический состав образцов из электротехнической стали 10895

Для оценки достоверности исследований также был проведён анализ химического состава образцов выполненных из Д16, Д16Т (рисунок 3.12-3.13).

```
        Анал Si
        Fe
        Cu
        Mn
        Mg
        Cr
        Ni
        Zn
        Ti
        B
        Be
        Bi

        1
        0.30854
        0.38603
        3.82277
        0.43612
        1.08300
        0.00403
        0.02647
        0.02879
        0.07322
        0.00023
        0.00020
        0.00113

        2
        0.26052
        0.35683
        2.24541
        0.29343
        0.75774
        0.00328
        0.01668
        0.02606
        0.06448
        0.00014
        0.00015
        0.00055

        3
        0.23121
        0.34748
        1.57394
        0.23060
        0.56247
        0.00277
        0.01211
        0.02587
        0.04433
        0.00010
        0.00011
        0.00054

        4
        0.27765
        0.352646
        3.41464
        0.41304
        1.04235
        0.0037
        0.02482
        0.04553
        0.00015
        0.00018
        0.00014

        6>
        0.27781
        0.33485
        4.04404
        0.45592
        1.18086
        0.00348
        0.02615
        0.04583
        0.00015
        0.00021
        0.00153

        7>
        0.27660
        0.33090
        4.11166
        0.45527
        <
```

Рисунок 3.12 – Химический состав образцов из алюминиевого сплава Д16

```
        Анал Si
        Fe
        Cu
        Mn
        Mg
        Cr
        Ni
        Zn
        Ti
        Be
        Bi

        1
        0.30854
        0.38603
        3.82277
        0.43612
        1.08300
        0.00403
        0.02647
        0.02879
        0.00023
        0.00020
        0.00113

        2
        0.26052
        0.35683
        2.24541
        0.29343
        0.75774
        0.00328
        0.01668
        0.02606
        0.06048
        0.00014
        0.00015
        0.00055

        3
        0.23121
        0.34748
        1.57394
        0.23060
        0.56247
        0.00277
        0.01211
        0.02857
        0.04433
        0.00010
        0.00011
        0.00054

        4
        0.27365
        0.32987
        3.12954
        0.37675
        0.95945
        0.00293
        0.02155
        0.02452
        0.04276
        0.00019
        0.00017
        0.00024

        5
        0.28424
        0.32646
        3.41464
        0.41304
        1.04235
        0.00348
        0.02452
        0.04589
        0.00018
        0.00017
        0.00020
        0.00018
        0.00017
        0.00200
        0.000153
        0.02452
        0.04689
        0.0002
```

Рисунок 3.13 – Химический состав образцов из алюминиевого сплава Д16Т

Исходная кристаллографическое строение материала оценивалось с помощью металлографического микроскопа. Образцы, перед УЗПД для дальнейших металлографических исследований предварительно отжигались в вакуумной печи «VSE VACUUM FURNANCE» при температуре 880 °C в течении 2х часов, с целью получения равноосной структуры и исключения влияния предварительных этапов обработки (рисунок 3.14). Нагрев до 880 °C осуществлялся в течении 4х часов. Охлаждение образцов производилось в печи. Оценка структуры осуществлялась на предварительно подготовленных микрошлифах, после травления 5% раствором азотной кислоты (рисунок 3.15) [30]. Металлографические исследования проводились путём анализа изображений, полученных c помощью металлографического инвертированного микроскопа отражённого света Zeiss Axiovert 40 MAT (рисунок 3.16).

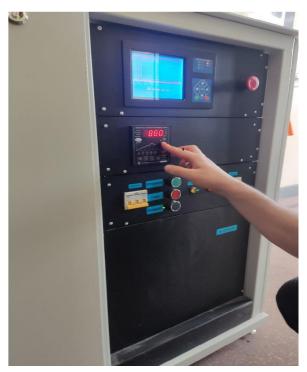


Рисунок 3.14 — Печь для проведения термической обработки в вакууме «VSE VACUUM FURNANCE»

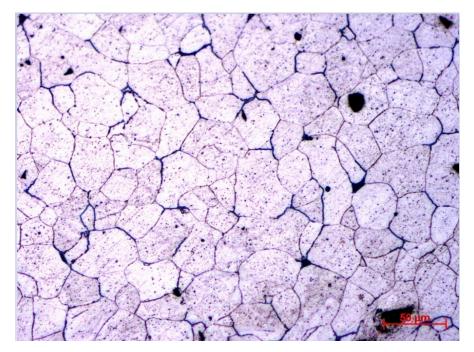


Рисунок 3.15 — Исходная структура образцов из электротехнической стали 10895



Рисунок 3.16 – Металлографический микроскоп Zeiss Axiovert 40 MAT

3.3 Методика проведения экспериментов

Экспериментальное исследование состояния как обработанных поверхностей, так и их исходного состояния осуществлялось по методикам, подробное описание которых представлено ниже.

Дюрометрические исследования образцов

Одним из комплексных показателей состояния поверхностного слоя, характеризующие его физико-механические свойства, является микротвёрдость. Измерение микротвёрдости поверхности проводилось на микротвердомере ПМТ-3М (рисунок 3.17), при нагрузках на пирамиду 0,2 H, 0,5 H.

Определение микротвёрдости проводилось согласно ГОСТ 9450 – 76 [30]. При оценке дюрометрических свойств соблюдалось требование к состоянию поверхности по показателю $Ra \leq 0.32$ мкм [28]. Значение микротвёрдости определялось по формуле (3.2)

$$H_{\mu} = 0.189 \frac{P}{d_{2}^{2}} \cdot 10^{6}, M\Pi a$$
 (3.2)

где P — прикладываемая нагрузка, d_2 — среднеарифметическое из длин двух диагоналей отпечатка после снятия нагрузки



Рисунок 3.17 – Микротвердомер ПМТ-3М

Степень упрочнения (наклёпа) определялась по отношению к исходному состоянию

$$\Delta H_{\mu_{HCX}} = \frac{H_{\mu} - H_{\mu_{HCX}}}{H_{\mu_{HCX}}} \cdot 100\% \tag{3.3}$$

где H_{μ} — микротвёрдость упрочнённой поверхности, $H_{\mu_{\text{nex}}}$ — микротвёрдость исходной поверхности.

Подготовка и получение микрошлифов

Исследования микроструктуры поверхностей, обработанных методом ультразвукового пластического поверхностного деформирования, проводились на установках оптической металлографии.

Металлографические и дюрометрические исследования проводились на металлографических шлифах, выполненных по следующей методике:

- 1. Подготовка образцов. Из образцов вырезался сектор, обладающий тем набором свойств, которым обладает исследуемая поверхность, без наличия зон, подвергнутых стороннему воздействию. Вырез производился на электроэрозионном станке *Sodick AG400L*, тем самым минимизировалось механическое воздействие на образец.
- 2. Вырезанные образцы заливались в полиэфирную смолу на гидравлическом прессе *Buehler SimpliMet* 1000 в следующей последовательности: прессование нагрев охлаждение (рисунок 3.18). Образец клался в прессовочную камеру исследуемой стороной вниз и засыпался полимером. Рабочая камера закрывалась и поджималась поршнем для создания давления.



Рисунок 3.18 – Гидравлический пресс Buehler SimpliMet 1000

3. Обработка рабочей поверхности шлифа проводилась механическим шлифованием кругами с разной степенью абразивности (с переходом на более мелкозернистую) с промыванием под водой, при оборотах 60...120 об/мин для вскрытия материала из полимера на шлифовально-полировальном станке *Buehler AutoMet* 300 (рисунок 3.19).



Рисунок 3.19 — Шлифовально-полировальный станок *Buehler AutoMet* 300

- 4. Полирование образцов проводилось на *Buehler AutoMet* 300 до зеркальной и гладкой поверхности с применением абразивных суспензий различной зернистости (от 1 до 9 мкм) с последовательным ее уменьшением (от большего значения к меньшему), и сменой направления обработки шлифа на 90° для образования однородной направленности «рисок» на поверхности при смене суспензии.
- 5. Химическое травление для выявления зёренной структуры поверхности образца осуществлялось реактивом состава: 5% HNO₃. Длительность травления составила 10-15 секунд.

Определение уровня залегания и величины остаточных напряжений

Оценка глубины, величины и напряжений знака остаточных определялось по методу Н. Н. Давиденкова на установке, описанной в работе [16, 33]. Процесс основан на послойном снятии поверхностного слоя исследуемой детали за счёт электрохимического травления в электролите и контроле её деформации в автоматическом режиме. В данном оборудовании используются методики и программное обеспечение, основанные на теории остаточных напряжений и деформаций естественно закрученных стержней с произвольным поперечным сечением, обеспечивающие высокую точность измерений. Установка представляет собой массивный литой корпус с установленной на него ёмкостью, в которую заливается травитель (рисунок 3.20). В неё погружался установленный в державке образец и подавалось напряжение, интенсифицирующее процесс травления. По мере стравливания поверхностного слоя, ввиду релаксации остаточных напряжений, образец деформировался на величину, определяемую тензометрическим датчиком, передающим информацию в реальном времени. В ходе эксперимента изменение знака и величины остаточных напряжений аппроксимировалось и выводилось на монитор в виде эпюр.



Рисунок 3.20 – Установка для автоматизированного определения остаточных напряжений

Методы исследования микрогеометрического состояния поверхности

Исследование геометрических параметров поверхности осуществлялось с помощью следующего оборудования: профилометра *MarSurf PS10*, комплекса изучения топографии *ZIGO New View 7300*, портальной контрольно-измерительной машины *ZEISS CONTURA*.

Изучение профилей поверхности в продольном сечении проводилось с помощью профилометра *MarSurf PS10* (рисунок 3.21). Данный прибор позволяет определять более 30 параметров, в том числе в соответствии с ГОСТ 2789-73 [28] и ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [31].

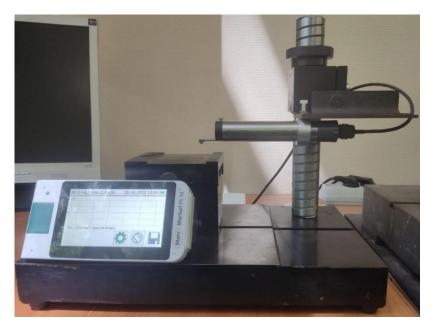


Рисунок 3.21 – Профилометр *MarSurf PS10* со стойкой

Топографию исследуемой поверхности определяли с помощью комплекса изучения топографии *ZYGO New View 7300* (рисунок 3.22). Данный прибор работает по принципу трёхмерной сканирующей интерферометрии и позволяет анализировать трёхмерное увеличенное изображение исследуемой поверхности. Кроме объёмной топограммы прибор также позволяет получить плоскую картину и профиль поверхности в выбранном сечении.



Рисунок 3.22 – Комплекс изучения топографии ZYGO NewView 7300

Изучение формы цилиндрических образцов в поперечном сечении осуществлялось на портальной контрольно-измерительной машине *ZEISS*

CONTURA (рисунок 3.23). Исследование проводилось методом сканирования исследуемой поверхности в рассматриваемом сечении. C помощью сопоставления начального и конечного результата проводилась оценка влияния УЗПД ПО тангенциальной схеме на отклонение формы обрабатываемых деталей.



Рисунок 3.23 — Контрольно-измерительная машина *ZEISS CONTURA*Определение деформационных характеристик

Оценка деформационных характеристик поверхностей, подвергнутых УЗПД и в исходном состоянии, проводилась путём испытания образцов при пульсирующем приложении растягивающей силы. Определение деформационных характеристик проводилось по методике от нулевого цикла с увеличивающейся амплитудой напряжений на каждом последующем цикле (рисунок 3.24) [26, 49, 78]. Оценка продольной деформации осуществлялась при помощи контактного экстензометра. Испытания проводились на универсальной сервогидравлической установке *BISS UT-100* (рисунок 3.25).

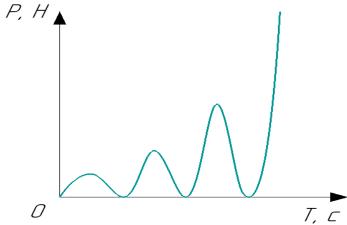


Рисунок 3.24 — Схема изменения прилагаемой нагрузки при оценке деформационных характеристик



Рисунок 3.25 — Универсальная сервогидравлическая установка *BISS UT-100*

Триботехнические испытания

Триботехнические испытания исследуемых образцов осуществлялось в условиях трения скольжения по схеме «диск-колодка» (рисунок 3.26) со смазкой. В качестве смазывающей среды использовалось масло вязкости 5W-40. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 23.204-78 и ГОСТ 30480-97 на машине трения ИИ 5018 (рисунок 3.27) [25, 29].

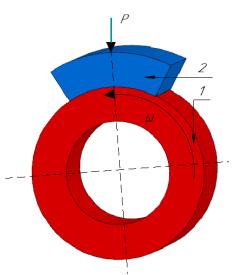


Рисунок 3.26 — Схема проведения испытаний на износостойкость по схеме «диск-колодка»: 1 — образец; 2 — колодка

Данный метод основан на изнашивании исследуемой поверхности вращающегося образца (диск) фиксированным деформатором (колодки) с определением объёмного, линейного или массового износа. Число оборотов образца составляло 300 об/мин, при нагрузке пары трения 300 Н.



Рисунок 3.27 – Машина трения ИИ5018

Сравнение результатов испытаний оценивалось путём построения графиков линейного износа образцов. Оценка проводилась на основе серии из трёх испытаний для каждого состояния поверхности путём определения линейного износа и значения коэффициента трения.

Выводы по 3 главе

- 1. Спроектирована и разработана технологическая установка для реализации УЗПД по тангенциальной схеме на базе токарно-винторезного станка 250ИТВМ.01, позволяющая регулировать угол ввода ультразвуковых колебаний относительно вектора скорости главного движения, положение инструмента по высоте, что обеспечивает обработку широкого диапазона размеров деталей.
- 2. Обоснован материал, форма и размеры образцов и методика их подготовки для проведения экспериментов по влиянию УЗПД по тангенциальной схеме на состояние поверхностного слоя обработанных поверхностей, с заданными исходными микрогеометрическими параметрами.
- 3. В рамках данной работы были выбраны методы оценки и оборудование:
- геометрического состояния комплексным методом: оценка изменения точности формы поверхности проводилось на КИМ Zeiss Contura, оценка объёмных характеристики обработанных поверхностей комплексом ZYGO NewView 7300, определение высотно-шаговых параметров шероховатости и волнистости осуществлялось профилометром MarSurf PS10;
- структурного состояния исследуемых образцов методом оптической металлографии с предварительной подготовкой исследуемых поверхностей;
- физико-механические свойства оценивались с помощью комплексного показателя механического состояния поверхностного слоя определением микротвёрдости как по длине, так и по глубине, а также наличием остаточных напряжений методом Давиденкова на сегментах колец, позволяющим проводить оценку величины, знака и глубины их залегания;
- эксплуатационных свойств модифицированных поверхностей определением износостойкости (машина трения ИИ5018) и деформационных характеристик (универсальная сервогидравлическая установка *BISS UT-100*).

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ УЗПД

Для подтверждения теоретических исследований, описанных в предыдущей главе, проведен процесс УЗПД по тангенциальной схеме на различных материалах и определено его влияние на итоговое состояние обработанной поверхности. Данная глава посвящена изучению влияния рассматриваемой обработки на значение геометрических параметров исследуемых поверхностей.

Геометрическое характеристики качества поверхности включают в себя отклонения размеров, формы, волнистость, шероховатость, которые определяются набором технологических методов и их параметров, используемых при формировании итогового состояния поверхности [35].

4.1 Отклонения размеров и формы

Оценка размеры деталей до И после обработки влияния на профилографирования осуществлялась участка поверхности, методом включающего как исходную, так и обработанную (рисунок 4.1). Изменение размеров оценивалось по расстоянию между касательными, проведёнными к исходному и обработанному профилю.

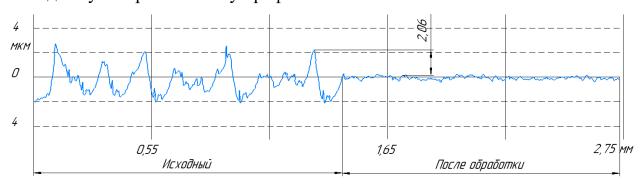


Рисунок 4.1 – Профиль поверхности до и после УЗПД на материале Д16Т (D = 50 мм, режим УЗПД: S = 0.07 мм/об, $V_V = 70.68$ м/мин, $P_{CT} = 60$ H)

Результаты исследования показали, что для выбранных материалов на рассматриваемых режимах обработки изменение диаметра составило от 2 до 5 мкм. Согласно ГОСТ 25347-2013 интервал допуска по 6-му для гладких деталей с диаметром от 36 до 50 мм составляет 16 мкм [26]. Сравнивая

изменение высоты профиля (см. рис. 4.1) с величиной допуска на данный размер (по 6-му квалитету) установлено, что величина изменения размера после УЗПД по тангенциальной схеме составляет до 32% от интервала допуска. На основании этого можно рекомендовать применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования для деталей с диаметральными размерами более 36 мм по 6 квалитету и грубее без припуска на обработку.

Отклонение формы цилиндрических образцов из Д16Т после УЗПД, а также для сравнения с наиболее распространённым методом ППД алмазным выглаживанием (АВ), изучалось в поперечном сечении. Для оценки отклонения от круглости использовались круглограммы, полученные на КИМ ZEISS Contura. Исследовалось как исходная форма сечения поверхности образцов, так и после УЗПД и АВ. Анализ круглограмм показал, что применение рассматриваемых методов ППД приводит к уменьшению отклонения от круглости (рисунок 4.2-4.4).

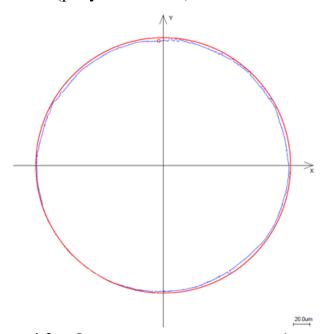


Рисунок 4.2 – Отклонение от круглости (исходное)

При этом наименьшее значение отклонения профиля наблюдается у УЗПД (0,38 мкм против 0,53 мкм при AB). Данные об влиянии режимов рассматриваемых методов ППД на отклонение от круглости представлено в таблице приложения Б, П.1.

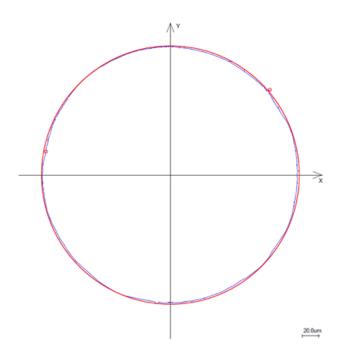


Рисунок 4.3 – Отклонение от круглости после АВ

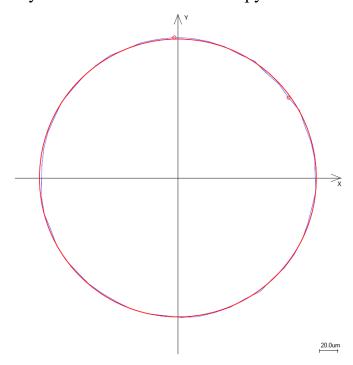


Рисунок 4.4 – Отклонение от круглости после УЗПД

Как видно из круглограмм применение УЗПД по тангенциальной схеме при обработке алюминиевого сплава Д16Т в представленном диапазоне технологических параметров (см. табл. прил. Б, П.2.) приводит к уменьшению значения отклонения от круглости. Это достигается за счёт перераспределения материала по поверхности обрабатываемой детали (перетекания с вершин во впадины).

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о том, что:

- рекомендуется назначать ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование по тангенциальной схеме для деталей по 6 квалитету и грубее без припуска на обработку;
- применение УЗПД приводит к уменьшению отклонения от круглости на 15-30 мкм;
- геометрическое состояние поверхности нужно формировать на предыдущих технологических операциях, используя УЗПД в роли финишной обработки.

4.2 Волнистость поверхности

Волнистостью поверхности называется совокупность периодически повторяющихся неровностей, расстояние между смежными возвышенностями или впадинами которых превышает базовую длину шероховатости [35, 59]. Установлено, что волнистость поверхности оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей [35, 103].

В настоящее время волнистость поверхности не регламентируется ГОСТом. В свою очередь параметры волнистости описаны в ГОСТР ИСО 4287— 2014 [31]. Параметры волнистости и шероховатости рассчитываются по аналогичным зависимостям [104].

Оценка значений параметров волнистости после применения УЗПД осуществлялось по профилограммам снятым с поверхности цилиндрических образцов (для образцов из Д16 представлены на рисунке 4.5). Для получения сравнительных данных также оценивалось состояние образцов после АВ.

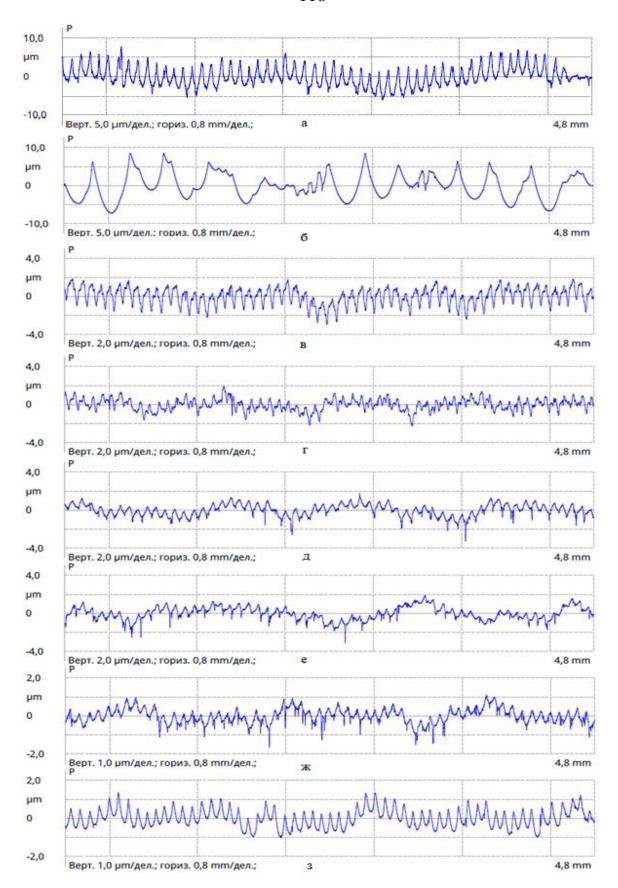


Рисунок 4.5 — Профилограммы поверхностей: а — исходное состояние, б — AB, в-з — УЗПД, с углом ввода колебаний β = 0°, 15°, 30°, 45°, 60° и 90° соответственно

Значения параметров волнистости обработанных поверхностей приведены в таблице 4.1. Обработка производилась при следующих режимах: $Д16 - P_{CT} = 30 \text{ H}, S = 0,1 \text{ мм/об}, V_V = 62,83 \text{ м/мин}; <math>Д16\text{T} - P_{CT} = 50 \text{ H}, S = 0,1 \text{ мм/об}, V_V = 70,68 \text{ м/мин}; сталь <math>10895 - P_{CT} = 100 \text{ H}, S = 0,1 \text{ мм/об}, V_V = 62,83 \text{ м/мин}.$ Нагрузка для каждого материала подбиралась таким образом, чтобы в процессе обработки обеспечивалась минимальная шероховатость поверхности.

Таблица 4.1 – Параметры волнистости поверхностей после ППД, мкм

Мате-	Пара-	Исх	AB	УЗПД	УЗПД	УЗПД	УЗПД	УЗПД	УЗПД
риал	метр			β= 0°	β=15°	β=30°	β=45°	β=60°	β=90°
Д16	Wz	11,59	15,22	1,89	3,17	3,26	3,81	2,21	2,07
	Wp	12,41	21,18	4,39	3,82	4	3,9	2,54	2,39
	Wsm	1,84	0,44	0,56	1,06	1,26	1,48	1,64	2,05
Д16Т	Wz	14,04	14,02	1,93	3,45	3,34	4,95	3,33	3,11
	Wp	21,14	17,89	2,55	3,97	4,4	5,99	3,84	3,48
	Wsm	0,84	0,63	0,78	0,81	0,87	0,94	1,44	1,49
10895	Wz	8,93	7,08	2,33	6,52	6,64	6,74	5,21	4,32
	Wp	12,66	10,75	2,98	7,46	7,32	6,75	5,54	5,42
	Wsm	0,92	0,51	0,84	1,01	1,66	1,85	1,95	1,82

Из таблицы 4.1 видно, что применение УЗПД по тангенциальной схеме приводит к уменьшению высоты волнистости. При этом заметно влияние угла ввода колебаний на итоговое состояние параметров Wz и Wp — наименьшая высота неровностей наблюдается при углах $\beta = 0^\circ$ и 90° соответственно (рисунок 4.6). При увеличении угла β от 0° до 45° наблюдается рост этих параметров.

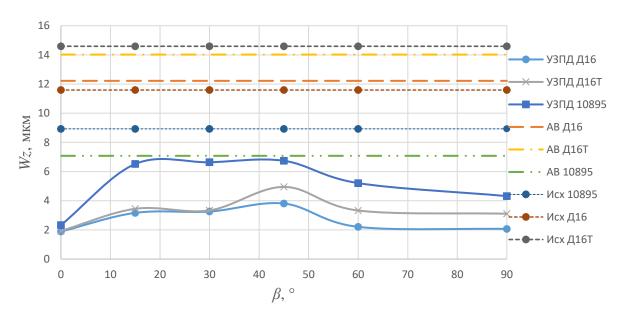


Рисунок 4.6 – Изменение Wz при AB и УЗПД

Также наблюдается изменение значений шаговых параметров волнистости (рисунок 4.7). Так наложение на инструмент ультразвуковых увеличению колебаний приводит К регулярности поверхности, что обуславливается более полным распределением материала в поверхностном слое. Использование УЗПД по сравнению с AB приводит к увеличению Wsm, что благоприятно сказывается на контактной жёсткости пар трения [66, 104]. При этом при увеличении угла β от 0 до 90° наблюдается увеличение значений шаговых параметров волнистости. Это можно объяснить тем, что материал обрабатываемой поверхности, при увеличении значения угла колебаний, подвергается более полному перераспределению в сторону подачи, обусловленного изменением движения деформирующего элемента. Максимальное значение *Wsm* наблюдается при значении угла $\beta = 90^{\circ}$.

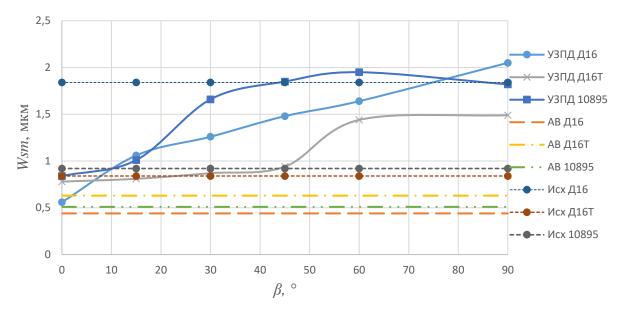


Рисунок 4.7 – Изменение Wsm при AB и УЗПД

Анализ показал, что формы профилей волнистости поверхности после AB и УЗПД различны (см. рис. 4.5). Профиль после AB (рисунок 4.5 б) 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 (рисунок 4.5 в-з). Стоит отметить, что регуляризация профиля оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства деталей [16, 18, 103, 112].

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- применение УЗПД обеспечивает более существенное уменьшение высоты волнистости и изменение формы её профиля, по сравнению с AB;
- изменение угла ввода колебаний β относительно главной скорости обработки оказывает экстремальное влияние на значения высотных параметров волнистости, с максимумом при $\beta = 45^{\circ}$;
- значения шаговых параметров волнистости поверхности находятся в линейной зависимости от параметра β увеличиваясь при изменении угла от 0 до 90°.

4.3 Шероховатость поверхности

Шероховатость поверхности представляет собой совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами. Она оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей, в частности на износостойкость, контактную жёсткость, коэффициент трения, коррозионную стойкость, усталостную выносливость и др. [19, 35, 104].

Определение влияния наибольшего числа технологических параметров УЗПД на характеристики шероховатости оценивалось на образцах из алюминиевого сплава Д16Т. На прочих материалах были проведены отдельные опыты с целью получения подтверждения закономерностей, установленных для Д16Т. Также проводилось АВ образцов, для сравнения итогового состояния поверхностей после обработки.

Для расчётов на контактную жёсткость и износостойкость необходимо знать радиусы закругления вершин выступов $r_{\rm B}$ [19, 35]. Для определения усталостных свойств поверхности важным параметром является радиус впадин шероховатости $r_{\rm BH}$ [19, 35]. Определение несущей способности и определение преобладания выступов или впадин поверхности оценивается параметром асимметричности профиля R_{sk} [104]. Как можно заметить знание большего числа параметров шероховатости позволяет наиболее полно оценивать эксплуатационные свойства поверхностей и является важным для решения практических задач.

Путём использования метода множественной линейной регрессии в обеспечении программном MatLab были получены математические зависимости, устанавливающие связь между технологическими параметрами УЗПД и геометрическими параметрами поверхности после обработки, которые позволяют прогнозировать итоговое микрогеометрическое состояние поверхности (факторы – P_{CT} , S) [20, 38]. В качестве высотного параметра было выбрано среднеарифметическое отклонение профиля (Ra), а шагового – профиля средний шаг неровностей (Sm). Оценка равномерности

распределения материала по высоте осуществлялась с помощью параметра t_P — относительной опорной длины профиля.

УЗПД проводилось при среднем значении амплитуды колебаний ($A \approx 12$ мкм), которая обеспечивает динамическое воздействие от ультразвукового поля и высокую стойкость рабочего инструмента.

На основе экспериментальных данных получены регрессионные зависимости (4.1, 4.3) изменения параметров шероховатости от технологических параметров УЗПД (рисунок 4.8-4.11) (Постоянные параметры обработки: $r_1 = 4$ мм, A = 12 мкм, f = 20 к Γ ц, D = 45 мм, $V_V = 70,68$ м/мин).

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

$$(4.1)$$

, где $Ra(\beta)$ — зависимость параметра Ra от изменения угла ввода колебаний β , описываемое выражением 4.2

$$Ra(\beta) = -0.6083 \cdot |\cos(0.0712(\beta - \frac{\pi}{2}))| + 0.5726 \cdot |\sin(0.0712(\beta - \frac{\pi}{2}))| + 0.0924 \cdot |\cos(0.1428(\beta - \frac{\pi}{2}))| - 0.0708 |\sin(0.1428(\beta - \frac{\pi}{2}))| - 0.1677 |\cos(0.2142(\beta - \frac{\pi}{2}))| - 0.0437 |\sin(0.2142(\beta - \frac{\pi}{2}))|$$

$$(4.2)$$

При этом точность результатов, описываемых данным выражением равна 99,985%.

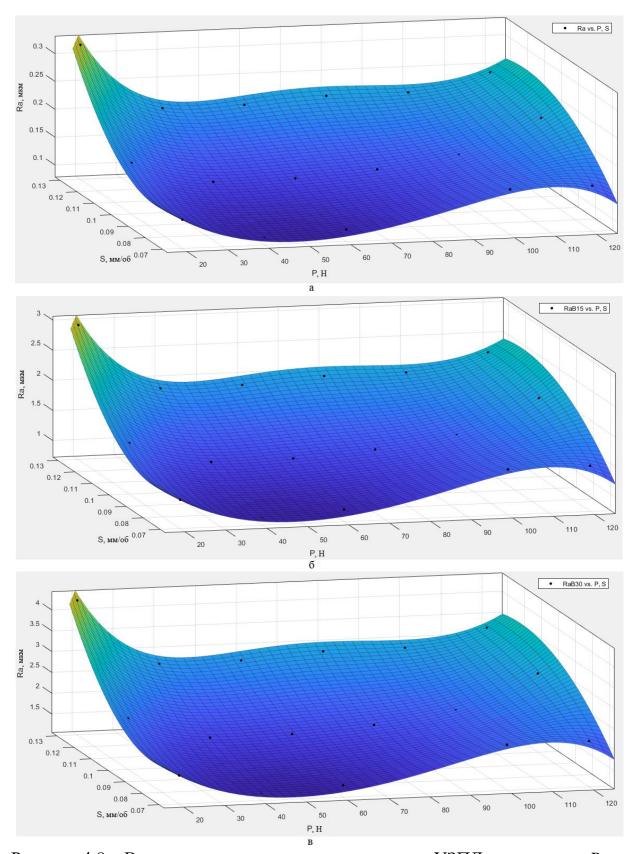


Рисунок 4.8 — Влияние технологических параметров УЗПД на параметр Ra: а $-\beta=0^\circ,\, 6-\beta=15^\circ,\, \mathrm{B}-\beta=30^\circ$

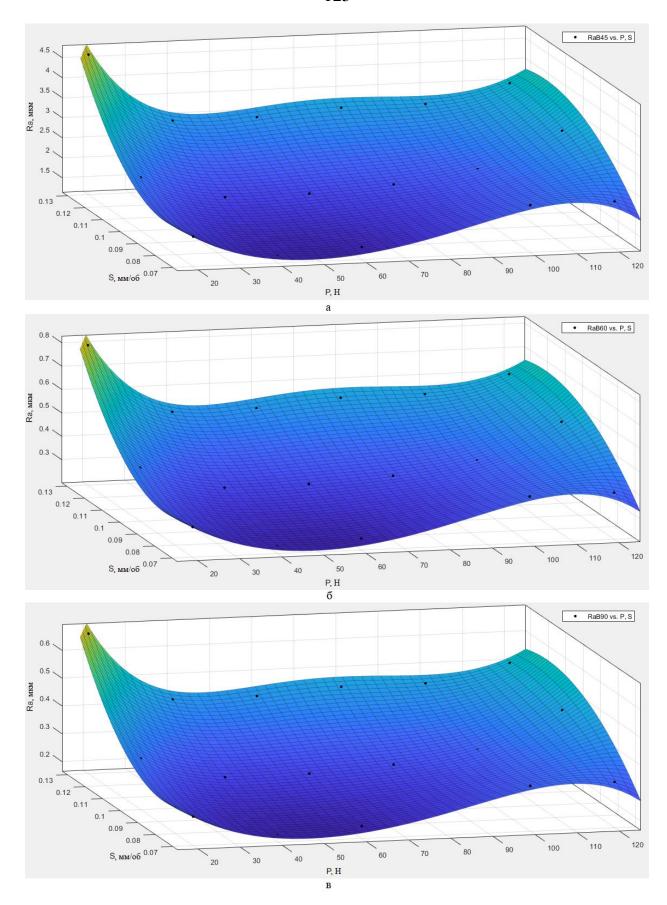


Рисунок 4.9 — Влияние технологических параметров УЗПД на параметр Ra: а $-\beta=45^\circ,\, 6-\beta=60^\circ,\, \mathrm{B}-\beta=90^\circ$

Из графиков 4.8-4.9 видно, что увеличение *S* приводит к росту значения параметра Ra. Изменение статической нагрузки $P_{\rm CT}$ имеет экстремальное влияние на значение среднеарифметического отклонения профиля, которое уменьшается при увеличении нагрузки до 50...60 Н и увеличивается при дальнейшем приросте прилагаемого статического усилия. Изучение влияния угла ввода колебаний на параметр Ra показало, что увеличение значения угла β до 45° сопровождается увеличением высоты профиля поверхности. Дальнейшее увеличение угла β до 90° приводит к резкому уменьшению параметра Ra, значение которого стремится к уровню, полученному при $\beta =$ 0°. Данная зависимость обусловлена изменением направления течения материала В деформируемой зоне, приводящим К структурным преобразованиям на поверхности обрабатываемой детали.

Изменение Sm подчиняется следующей зависимости (4.3)

$$Sm = 61,89 - 2,734P_{CT} + 480,7S + 0,1061P_{CT}^{2} - 4,454P_{CT}S - 3347S^{2} - 0,0011P_{CT}^{3} - (4.3)$$
$$-0,1525P_{CT}^{2}S + 119,4P_{CT}S^{2} + 4,127 \cdot 10^{-6}P_{CT}^{4} + 0,0014P_{CT}^{3}S - 0,8233P_{CT}^{2}S^{2} + Sm(\beta)$$

, где $Sm(\beta)$ — зависимость значения параметра Sm от изменения угла ввода колебаний β , описываемое выражением (4.4)

$$Sm(\beta) = -0.0001 |\beta - 90|^3 + 0.028 |\beta - 90|^2 - 0.0623 |\beta - 90|$$
 (4.4)

Достоверная точность определения Sm данным выражением равна 95,21%.

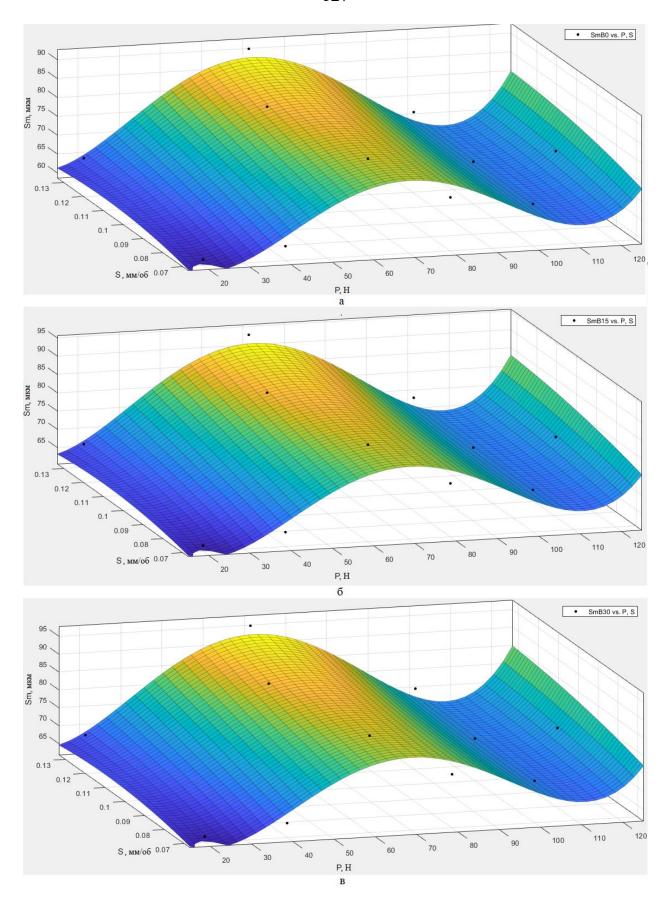


Рисунок 4.10 — Влияние технологических параметров УЗПД на параметр Sm: $a-\beta=0^\circ,\, 6-\beta=15^\circ,\, B-\beta=30^\circ$

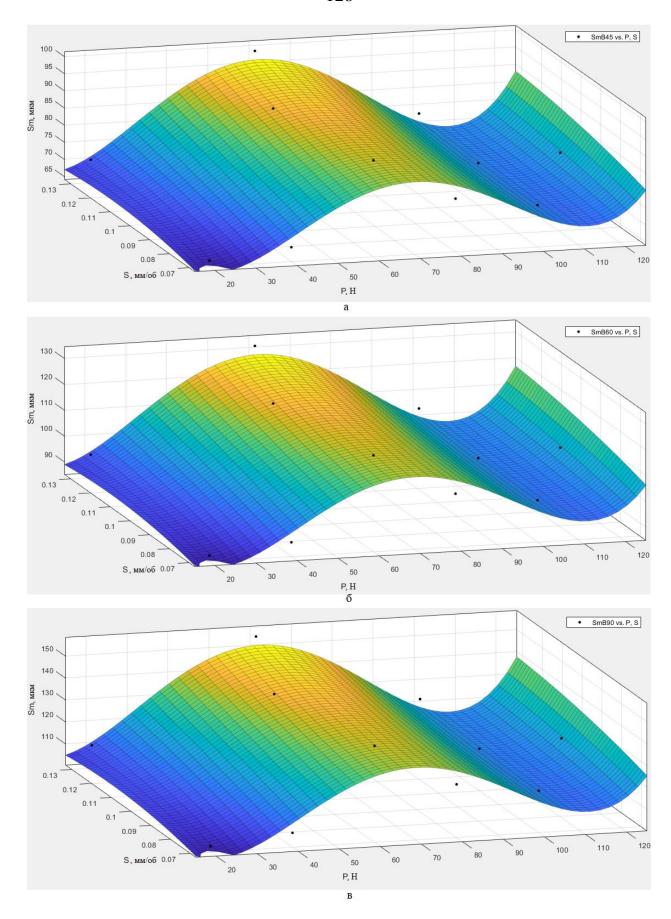


Рисунок 4.11 — Влияние технологических параметров УЗПД на параметр Sm: $a-\beta=45^\circ,\, \delta-\beta=60^\circ,\, B-\beta=90^\circ$

Согласно графикам, представленным на рисунках 4.10-4.11 увеличение значения подачи S приводит к увеличению Sm. Увеличение значения прилагаемой нагрузки от 20 до 60 Н приводит к увеличению среднего шага неровностей. Дальнейший рост нагрузки приводит к постепенному уменьшению параметра Sm, что обуславливается чрезмерным давлением в зоне деформирования, ведущим к излишнему перераспределению обрабатываемого материала. Увеличение угла ввода колебаний приводит β от 0 до 90° приводит к увеличению Sm. Стоит отметить, что влияние угла ввода колебаний на средний шаг неровности практически сопоставимо с влиянием, оказываемым изменением прилагаемой нагрузки.

Из описанных выше данных и приведённых в приложении Б, П.1, можно сделать вывод о том, что рациональным значением нагрузки при УЗПД, обеспечивающим наименьшие высотные и наибольшие шаговые параметры, для материала Д16Т является значение силы около $P_{\rm CT} = 60~{\rm H}.$

Аналогичные закономерности влияния параметров УЗПД на параметры шероховатости наблюдаются при обработке других исследуемых материалов. Так для образцов из стали 10895 изменение статического нагружения от 0 до 100 Н при УЗПД приводит к уменьшению значения среднеарифметического отклонения профиля с 0,847 мкм до 0,18 мкм (рисунок 4.12). Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к чрезмерному течению материала в обрабатываемой зоне, обуславливая ухудшения состояния обрабатываемой поверхности (рост Ra). При АВ наблюдается формирование больших значений Ra, в исследуемом диапазоне $P_{\rm CT}$ (до Ra = 0,34 мкм).

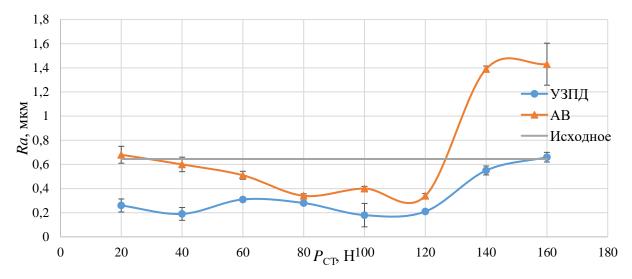


Рисунок 4.12 — Влияние P_{CT} на значение Ra образцов из стали 10895 ($V_V = 62.8 \text{ м/мин}, S = 0.1 \text{ мм/об}$)

Стоит отметить тот факт, что ввод ультразвуковых колебаний в зону обработки позволяет формировать микрогеометрическое состояние поверхности при меньших значениях силы нагружения, что может быть важно при обработке деталей с покрытиями или нежёстких деталей (рисунок 4.12). Это обусловлено более сложным характером движения инструмента, обеспечивающим лучшее заполнение исходных впадин и распределение материала по обрабатываемой поверхности.

Похожие зависимости наблюдаются и при обработке Д16 (рисунок 4.13) увеличение нагрузки приводит к увеличению Ra. Из анализа рисунка 4.13 можно сделать вывод о том, что даже нагрузки в 20 Н достаточно для того, чтобы сгладить шероховатость в пределах исходной. Увеличение нагрузки выше 60 Н нецелесообразно, так как ведёт к обильному течению материала и Также графика росту ИЗ видно, ЧТО полученные значения среднеарифметического отклонения профиля при УЗПД больше значений, полученных при алмазном выглаживании, за счёт более активного перемещения материала в поверхностном слое.

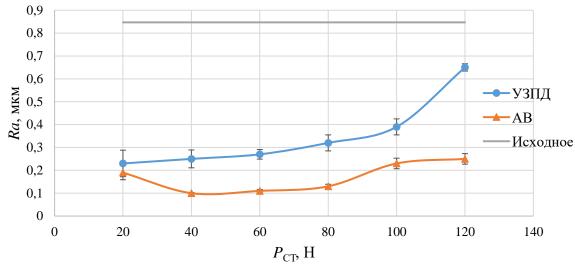


Рисунок 4.13 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение Ra образцов из алюминиевого сплава Д16 (V_V = 70,6 м/мин, S = 0,1 мм/об)

Влияние изменения P_{CT} на Ra образцов из Д16Т представлено на рисунке 4.14, из которого видно, что У3ПД позволяет достигать меньших значений параметра Ra практически при всём исследуемом диапазоне изменения статической нагрузки, по сравнению AB. Оптимальная нагрузка при У3ПД сплава Д16Т находится в интервале от 40 до 80 Н. Этот факт говорит о том, что минимальная шероховатость при ультразвуковой обработке может быть достигнута в более широком диапазоне, относительно процесса AB. Стоит обратить внимание на то, что в данном случае наблюдается уменьшение среднеарифметического отклонения профиля на всём диапазоне изменения нагрузки, что говорит о положительном воздействии рассматриваемых методов ППД.

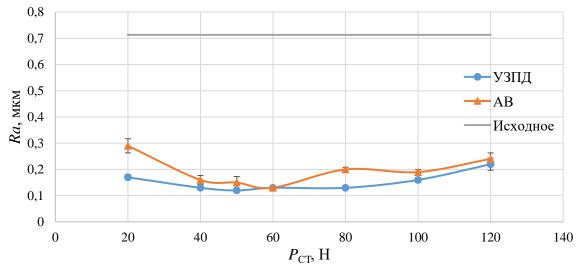


Рисунок 4.14 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение Ra образцов из алюминиевого сплава Д16Т (V_V = 70,6 м/мин, S = 0,1 мм/об)

При обработке образцов из Л68 не наблюдается достижения критической нагрузки, ведущей к значительному ухудшению высотных параметров шероховатости (рисунок 4.15). При этом наблюдается уменьшение Ra на всём исследуемом диапазоне с Ra = 1,49 мкм до Ra = 0,21 мкм.

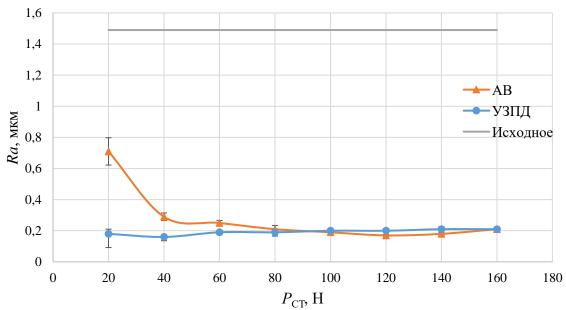


Рисунок 4.15 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение Ra образцов из Л68 (V_V = 62,8 м/мин, $S=0,1\,$ мм/об)

Полученные значения параметров шероховатости говорят о том, что применение УЗПД по тангенциальной схеме возможно в качестве финишной

обработке деталей (с диаметром более 36 мм) по 5-му квалитету точности и грубее [104].

Влияние $P_{\text{СТ}}$ на шаговые параметры шероховатости Sm проявляется аналогично шаговым параметрам волнистости (рисунок 4.16). Максимальное значение данный параметр принимает при значении прилагаемой нагрузки $P_{\text{СТ}} = 80...100 \text{ H}$ (для УЗПД). Как и в случае с Ra дальнейшее увеличение нагрузки приводит к уменьшению параметра Sm.

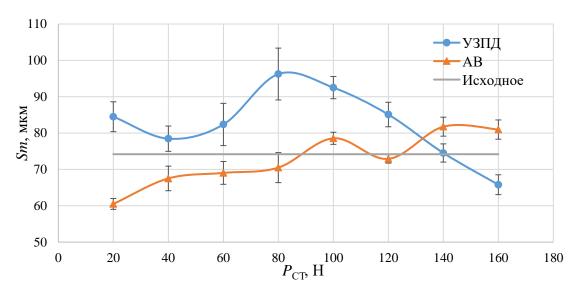


Рисунок 4.16 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение Sm образцов из стали 10895 ($V_V = 62.8 \text{ м/мин}$, S = 0.1 мм/об)

При АВ максимальное значение среднего шага неровностей наблюдается при увеличении нагрузки до 140 Н и в отличии от УЗПД не уменьшается при росте нагрузки до 160 Н. Вероятно это связано тем, что в процессе УЗПД перемещение инструмента относительно обрабатываемой детали не линейно, а осуществляется по сложной траектории, что обуславливает при повышенных значениях $P_{\rm CT}$ существенное перераспределение материала, ведущее к уменьшению среднего шага неровности.

Несколько иная картина наблюдается при обработке образцов из алюминиевого сплава Д16Т (рисунок 4.17).

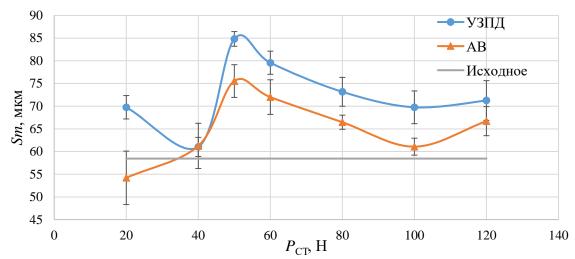


Рисунок 4.17 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение Sm образцов из алюминиевого сплава Д16Т (V_V = 70,6 м/мин, S = 0,1 мм/об)

Наибольшее значение параметра Sm как при УЗПД, так и при АВ наблюдается при значении $P_{\rm CT}=50...60$ Н. Но при этом дальнейшее её увеличение до 120 Н не приводит к уменьшению среднего шага неровностей ниже значения, характерного для исходной поверхности.

В случае с Д16 (рисунок 4.18) наибольшее значение Sm наблюдается при $P_{\rm CT}=20\,$ Н. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к некоторому уменьшению Sm, значение которого варьируется в очень малом диапазоне, в отличии от AB.

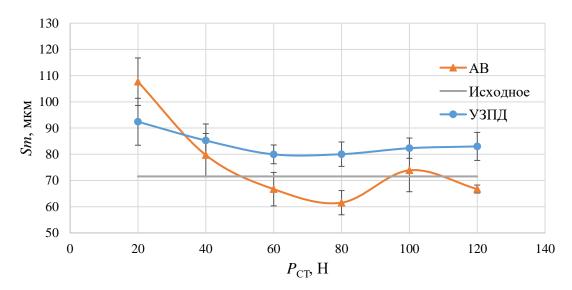


Рисунок 4.18 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение Sm образцов из алюминиевого сплава Д16 ($V_V = 62.8$ м/мин, S = 0.1 мм/об)

В случае с обработкой Л68 влияние $P_{\rm CT}$ на Sm представлено на рисунке 4.19. При обработке Л68 наблюдается уменьшение значения Sm с увеличением прилагаемой нагрузки. Это связано с более грубым профилем исходной поверхности, характеризующегося высокими значениями высотных шероховатости. обусловило показателей Это активное перемещение материала с пиков профиля на его впадины с одновременным формированием нового рельефа поверхности. Несмотря на это можно заметить, что применение УЗПД обеспечивает бо́льшие значения параметра Sm, чем AB.

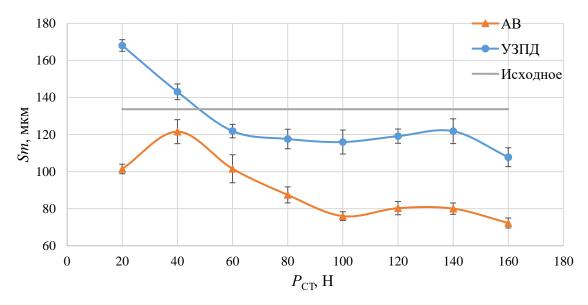


Рисунок 4.19 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение Sm образцов из Л68 ($V_V=62.8$ м/мин, S=0.1 мм/об)

Относительная опорная длина профиля оказывает значительное влияние эксплуатационные свойства рабочих поверхностей, на такие как износостойкость, прирабатываемость И д.р. Ha рисунках 4.20-4.22 представлено изменение данного параметра при варьировании статической нагрузки на уровне глубины профиля 1 мкм.

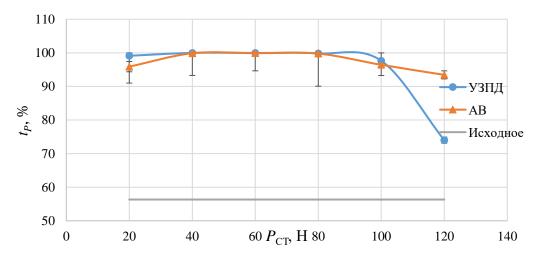


Рисунок 4.20 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение t_P образцов из Д16 (V_V = 62,8 м/мин, $S=0,1\,$ мм/об)

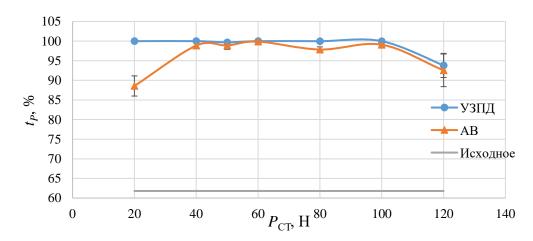


Рисунок 4.21 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение t_P образцов из Д16Т (V_V = 70,6 м/мин, S = 0,1 мм/об)

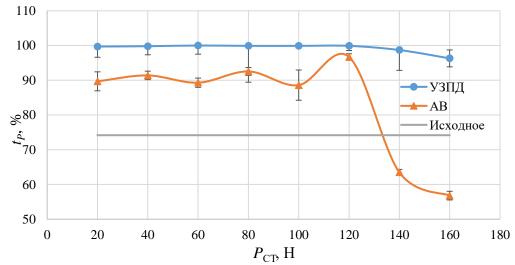


Рисунок 4.22 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение t_P образцов из стали 10895 ($V_V=62.8$ м/мин, S=0.1 мм/об)

Из рисунков 4.19-4.21 видно, что применение УЗПД обеспечивает формирование микрогеометрии с высокими значениями относительной опорной длины профиля. При этом влияние нагрузки на t_P аналогично для рассматриваемых материалов обеспечивается оптимальное значение, до критического значения $P_{\text{КРИТ}}$, после которого наблюдается ухудшение несущей способности обработанной поверхности и образование волн текучести на поверхности обработанных деталей (что видно из сравнения профилограмм поверхностей деталей из Д16 после УЗПД по тангенциальной схеме при различных значениях P_{CT} на рисунке 4.23).

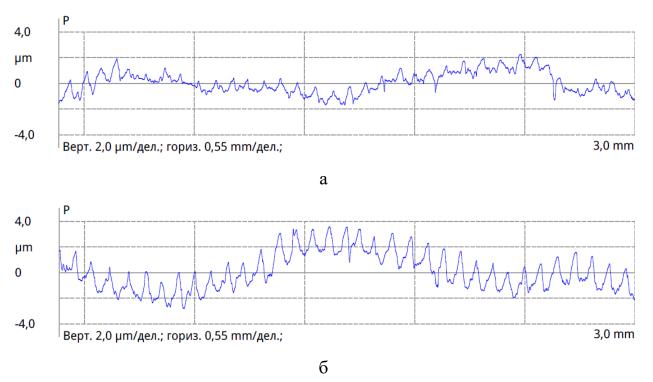


Рисунок 4.23 — Профилограммы поверхности образцов из Д16 при различном значении t_P (V_V = 62,8 м/мин, S = 0,1 мм/об), а — $P_{\rm CT}$ = 60 H, t_P = 100 %; б — $P_{\rm CT}$ = 120 H, t_P = 74 %

Из анализа профилограмм видно, что поверхность образца из Д16 после обработки при значении статического усилия $P_{\rm CT}=60~{\rm H}$ (см. рис. 4.23, а) не наблюдается активного формирования волн на поверхности детали и волнистость поверхности определяется её исходным состоянием (при этом t_P = 100 %). В случае, когда применение УЗПД по тангенциальной схеме проводится с значением $P_{\rm CT}$ выше критического, то наблюдается чрезмерное

течение материала, ведущее к образованию волнистости (рисунок 4.24, б), что ухудшает несущие свойства поверхности (наблюдается уменьшение t_P и рост высотных параметров волнистости). На основании полученных данных определены граничные условия обработки — применение УЗПД по тангенциальной схеме обеспечивает формирование микрогеометрического состояния поверхностного слоя, без образования волнистости, при значении статической нагрузки $P_{\text{СТ}} \leq P_{\text{КРИТ}}$. Полученные зависимости справедливы и для остальных исследуемых материалов. Для рассматриваемых материалов значения критической нагрузки, при радиусе инструмента $r_1 = 4$ мм: алюминиевый сплав Д16 $P_{\text{КРИТ}} = 80$ H; алюминиевый сплав Д16 $T_{\text{КРИТ}} = 100$ H; сталь $T_{\text{СТ}} = 100$ H; латунь $T_{\text{СТ}} = 100$ H.

Из закономерностей, полученных для Л68, видно, что достижения критической нагрузки, приводящей к уменьшению опорной длины профиля, не наблюдается (рисунок 4.24).

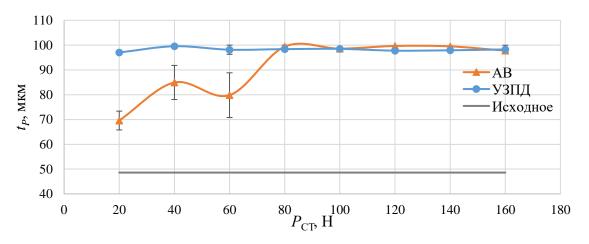


Рисунок 4.24 — Влияние $P_{\rm CT}$ на значение t_P образцов из Л68 (V_V = 62,8 м/мин, $S=0,1\,$ мм/об)

Анализ графика (см. рис. 4.24) позволяет сделать вывод о том длина опорной поверхности более 97% поверхности после УЗПД обеспечивается уже при нагрузке от 20 H, в то время как в случае с AB – от 80 H.

Уменьшение опорной длины профиля совместно с ростом шагового параметра *Ra* указывают на то, что начинается процесс волнообразования на обрабатываемой поверхности. Поэтому с целью исключения образования

волнистости при назначении технологических режимов УЗПД по тангенциальной схеме, рекомендуется сочетание требуемого значения Ra при обеспечении наибольшего значения t_P .

На основании полученных графиков было получено выражение, для определения $P_{\text{КРИТ}}$ (H) при обработке исследуемых материалов методом УЗПД по тангенциальной схеме (A=12 мкм, f=20 к Γ ц, $r_1=4$ мм):

$$P_{KPHT} = 0.0041HB^2 - 0.153HB + 84.44 \tag{4.5}$$

Значение параметров $r_{\rm B}$ и $r_{\rm B\Pi}$ и R_{sk} после УЗПД и АВ на оптимальных режимах приведено в таблице 4.2 (V_V = 63,7 м/мин (V_V = 70,6 для Д16Т), S = 0,1 мм/об).

$$r_{B} = \frac{9Ra^{2}S^{2}}{128(R_{P} - 0.5Ra)^{3}}$$
 (4.6)

$$r_{BII} = \frac{9Ra^2S^2}{128(5,5Ra - R_P)^3} \tag{4.7}$$

Таблица 4.2 - 3начение параметров r_B и $r_{B\Pi}$ и R_{sk} после ППД

таолица 1.2	Sha feline hapametpeb / B ii / Bii ii 145k ii este 11172							
Материал	Технология	P_{CT} , H	r_{B} , MKM	$r_{\mathrm{B\Pi}}$, MKM	R_{sk}			
Д16	Исходное	-	18	45	0,67			
Д16	УЗПД	40	219	130	- 0,5			
Д16	AB	20	201	289	- 0,8			
Д16Т	Исходное	-	31	140	0,47			
Д16Т	УЗПД	60	311	160	-0,33			
Д16Т	AB	60	237	138	-0,4			
10895	Исходное	-	12	537	-1,12			
10895	УЗПД	100	390	129	-0,01			
10895	AB	100	267	27	-1,56			
Л68	Исходное	-	37	83	-0,11			
Л68	УЗПД	160	567	130	-0,32			
Л68	AB	160	371	47	-0,12			

Анализ данных, представленных в таблице 4.2, показал, что применение УЗПД позволяет обеспечить микрогеометрическое состояние поверхности с более высокими значениями параметров средних радиусов впадин и вершин, что должно благоприятно сказаться на контактной жёсткости, износостойкости и усталостных свойствах модифицированных деталей. Все

профили имеют отрицательное значение асимметричности, характеризующее высокую несущую способность, оказывающую благоприятное влияние на процесс приработки и износостойкость поверхности [103].

Влияние изменения угла β на параметры шероховатости также исследовалось на образцах из стали 10895 и алюминиевого сплава Д16 (рисунок 4.25-4.28).

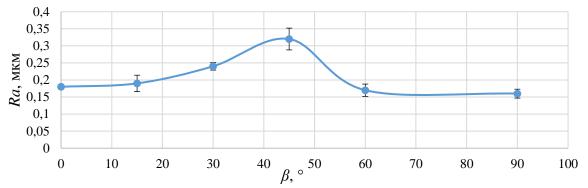


Рисунок 4.25 — Влияние угла β на значение Ra образцов из стали 10895 ($V_V = 62.8 \text{ м/мин}, S = 0.1 \text{ мм/об}$)

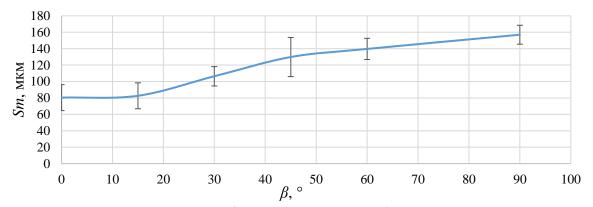


Рисунок 4.26 — Влияние угла β на значение Sm образцов из стали 10895 (V_V = 62,8 м/мин, S = 0,1 мм/об)

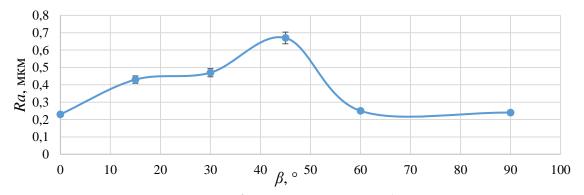


Рисунок 4.27 — Влияние угла β на значение Ra образцов из алюминиевого сплава Д16 (V_V = 62,8 м/мин, S = 0,1 мм/об)

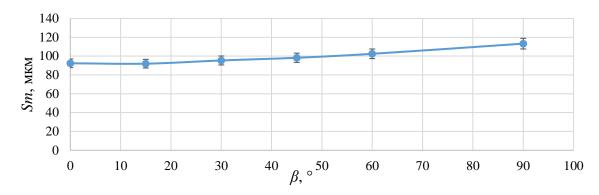


Рисунок 4.28 — Влияние угла β на значение Sm образцов из алюминиевого сплава Д16 ($V_V = 62.8$ м/мин, S = 0.1 мм/об)

Из рисунков 4.25-4.28 видно, что при изменении значения угла ввода колебаний β от 0 до 45° наблюдается увеличение Ra. Дальнейшее увеличения угла приводит к уменьшению среднеарифметического отклонения профиля ниже значений, характерных для состояния поверхности при угле $\beta = 0^{\circ}$. Изменение значения Sm линейно увеличивается при росте значения угла ввода колебаний относительно главной скорости обработки. Эти согласуются с результатами, полученными на образцах из алюминиевого сплава Д16Т (см. рис. 4.8-4.11). Значительного влияния β на значение опорной длины профиля не прослеживается (см. табл. прил. Б, П.2). Также из таблиц видно, что влияние угла β на значения параметров $r_{\rm B}$ и $r_{\rm B\Pi}$ схоже с влиянием, оказываемым на Sm.

На основании этого можно сделать вывод о том, что угол ввода колебаний β относительно вектора главной скорости является технологическим параметром УЗПД, поскольку оказывает влияние на геометрическое состояние обработанной поверхности.

Согласно данным приведённым в приложении Б, П.2 при близких значениях высотных параметров шероховатости маслоёмкость поверхностей после УЗПД выше, чем после АВ. Это обусловлено формированием на поверхности сложного профиля ячеистой формы, в углублениях которой будет находится смазка, что должно оказать благоприятный эффект на износостойкость обработанной поверхности.

Влияние главной скорости обработки на значения параметров шероховатости формируемой поверхности незначительное. Это связано с тем, при наличии ультразвуковых колебаний инструмента степень деформации поверхности остаётся высокой, что обеспечивает выглаживающий эффект даже при скоростях обработки до 200 м/мин.

Проведённые исследования позволили сформулировать рекомендации по требованиям к исходному состоянию поверхности перед УЗПД по тангенциальной схеме, её параметры шероховатости должны соответствовать условиям Rz < 6,3 мкм, Ra < 1,25 мкм для достижения Rz < 1,5 мкм, Ra < 0,3 мкм.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

- выведено выражение, позволяющее прогнозировать итоговые значения шероховатости Ra и Sm от изменения $P_{\rm CT}$, S, β при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании по тангенциальной схеме деталей, выполненных из алюминиевого сплава Д16Т;
- для каждого материала установлено рациональное значение прилагаемого статического нагружения $P_{\rm KPUT}$ и получено уравнение для его подсчёта, при котором обеспечивается достижение наименьших высотных и наибольших шаговых параметров шероховатости поверхности (при фиксированных параметрах A=12 мкм, f=12 мкм, $r_1=4$ мм): Д $16-P_{\rm CT}=40$ H; Д $16T-P_{\rm CT}=60$ H; $10895-P_{\rm CT}=100$ H; Л $68-P_{\rm CT}=160$ H;
- увеличение β от 0 до 45° сопровождается ростом высотных параметров шероховатости, при дальнейшем росте до 90° наблюдается обратная тенденция, при этом формируется состояние поверхности сопоставимое с достигаемым при β = 0°, а для некоторых материалов и лучшее;
- влияние угла β на шаговый параметр Sm выражается линейной зависимостью, достигая наибольшего значения при 90° ;
- увеличение подачи приводит к росту высотных параметров микрогеометрии, что обусловлено меньшей степенью наложения следов

обработки. Для повышения производительности требуется назначать максимальное значение S, при котором качество обработанной поверхности соответствует требуемому;

- использование УЗПД для деталей, выполненных из материалов различной твёрдости (НВ31...НВ150) обеспечивает формирование поверхности с высотно-шаговыми параметрами микрогеометрии (Ra < 0.8 мкм), которые должны назначаться при изготовлении деталей по 5 квалитету точности и грубее, что говорит о возможности его применения данного метода в качестве финишного при обработке точных и прецизионных деталей;
- применение УЗПД обеспечивает формирование поверхности с меньшими значениями высотных и большими значениями шаговых параметров шероховатости, по сравнению с AB, для материалов, с твёрдостью менее HB150.

В инженерной практике для определения эксплуатационных свойств которые деталей машин И приборов важно иметь параметры, характеризовали не только отдельные сечения, но и всю микрогеометрию поверхности, то есть давали бы трёхмерное представление о поверхности. Многочисленными исследованиями установлено, что параметры (ΓΟСΤ 2789-73) шероховатости недостаточно полно описывают функциональные свойства поверхности в различных эксплуатационных условиях [19, 35, 104].

4.4 Морфология поверхности после ультразвукового поверхностного пластического деформирования

Трёхмерное (микротопографическое) состояние поверхности вызывает практический и научный интерес, поскольку представляет собой общее состояние обработанной поверхности детали. Определение данного состояния поверхности возможно, как за счёт анализа большого количества профилограмм, записанных на параллельных траекториях, находящихся друг от друга на величину шага или с помощью записей профилей во

взаимоперпендикулярных направлениях, например продольном и поперечном [35]. Предложенные методы не являются оптимальными, поскольку достаточно трудоёмки. Поэтому в работе наряду с профилографированием проводились металлографические и топографические исследования.

Комплексное исследование данными методами позволило получить детальное представление о состоянии поверхности после УЗПД и его микрогеометрическом строении. В результате металлографических исследований установлено, что применение УЗПД позволяет формировать специфическую структуру поверхности, не характерную для других методов обработки. Данные поверхности имеют регулярное фрагментированное строение с малыми значениями высотных параметров шероховатости (рисунок 4.29 - 4.31).

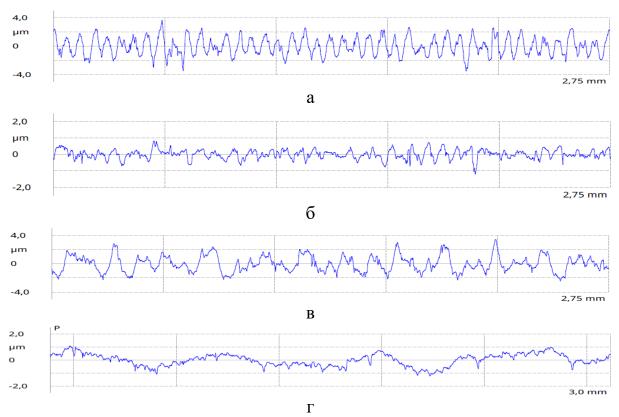


Рисунок 4.29 — Профилограммы поверхностей: а — исходная поверхность (материал — Д16); б — УЗПД (материал — Д16) ($P_{\rm CT}$ = 40 H, V_V = 62,8 м/мин, S = 0,1 мм/об); в - исходная поверхность (материал — Д16Т); г - УЗПД (материал — Д16Т) ($P_{\rm CT}$ = 60 H, V_V = 62,8 м/мин, S = 0,1 мм/об)

Результаты, приведённые на профилограммах (рисунок 4.29) указывают на то, что применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования по тангенциальной схеме позволяет уменьшать исходную шероховатость поверхности. В случае с обработкой сплава Д16 наблюдается незначительное изменение шаговых параметров (по сравнению с исходным), при уменьшении высоты неровностей. Применение УЗПД при обработке образца из Д16Т, на приведённом режиме, помимо снижения высотных характеристик также существенно изменяет средний шаг микронеровностей.

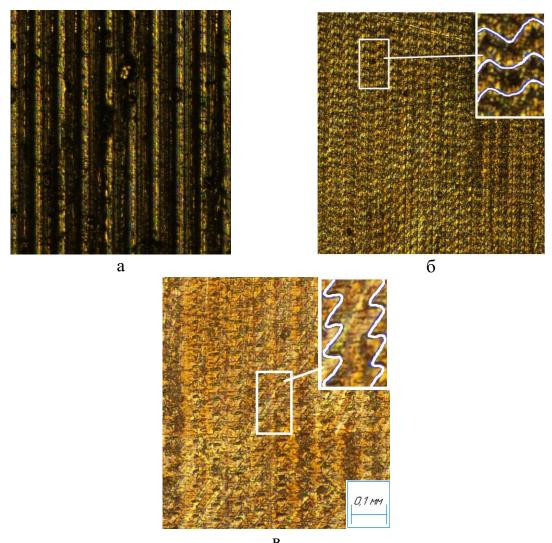


Рисунок 4.30 — Морфология поверхности образцов из меди М1: а — исходная; б — УЗПД ($P_{\rm CT}=60$ H, $V_V=56$ м/мин, $\beta=0^\circ$); в — УЗПД ($P_{\rm CT}=60$ H, $V_V=56$ м/мин, $\beta=60^\circ$)

Из приведённых иллюстраций видно (см. рис 4.30-4.31), что после УЗПД на поверхности образцов из меди М1 и алюминиевого сплава Д16 в выбранном

диапазоне технологических параметров наблюдается сглаживание неровностей предыдущей обработки, при этом происходит формирование специфической микрогеометрии, имеющей ячеистое строение без образования волнистости на поверхности детали. Установлено, что изменение угла ввода колебаний влияет на ориентацию ячеек формируемой поверхности, что подтверждает теоретическое описание процесса УЗПД.

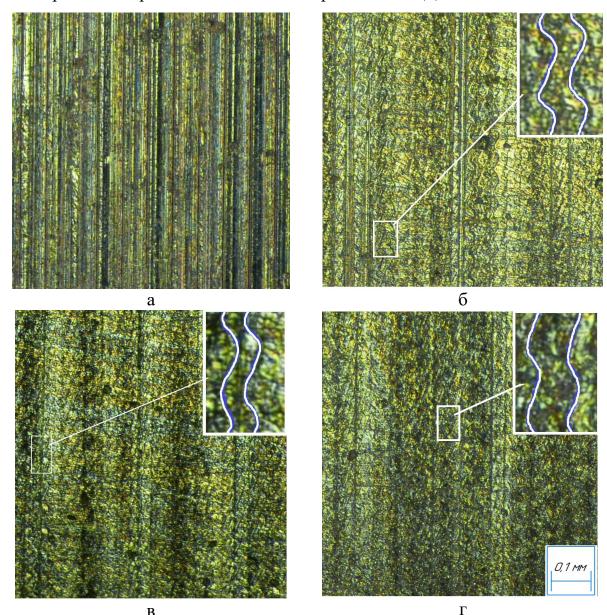


Рисунок 4.31 — Морфология поверхности образцов из алюминиевого сплава Д16: а — исходная; б — УЗПД ($P_{\rm CT}$ = 30 H; β = 45°, V_V = 62,8 м/мин); в — УЗПД ($P_{\rm CT}$ = 40 H; β = 45°, V_V = 62,8 м/мин); г — УЗПД ($P_{\rm CT}$ = 60 H; β = 45°, V_V = 62,8 м/мин)

Сравнение состояния поверхности образцов после УЗПД и AB приведены на рисунке 4.32.

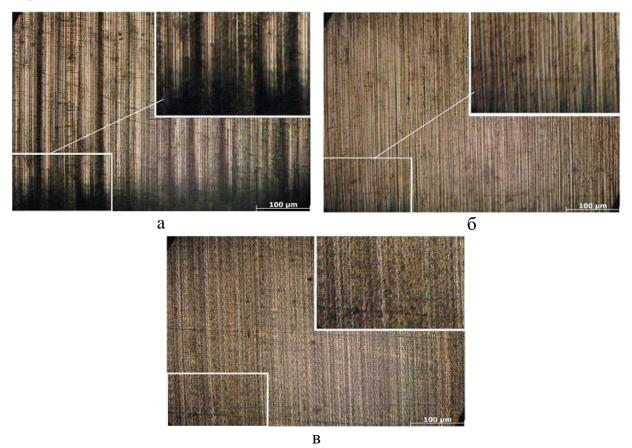
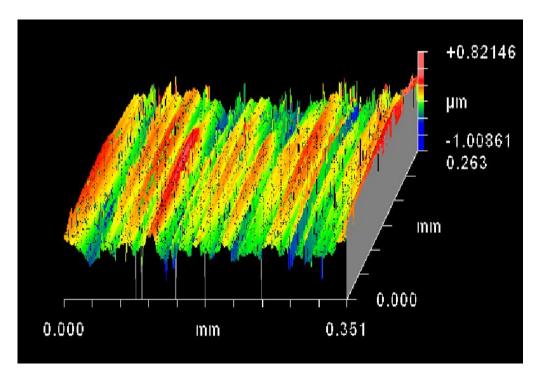


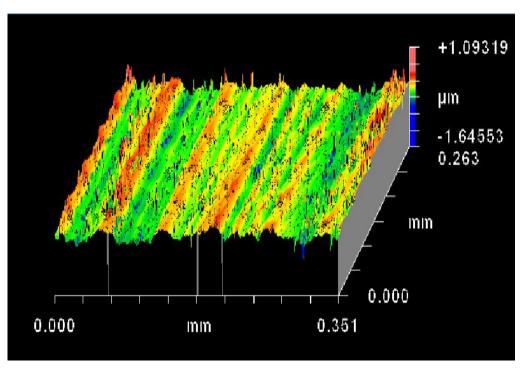
Рисунок 4.32 — Поверхности образцов из Д16Т до и после обработки а) исходная поверхность; б) АВ ($P_{\rm CT}=60~{\rm H},\,S=0,1~{\rm mm/o6};\,V_V=70,68~{\rm m/muh});$ с) УЗПД по тангенциальной схеме ($P_{\rm CT}=60~{\rm H},\,S=0,1~{\rm mm/o6};\,V_V=70,68~{\rm m/muh})$

Анализ приведённых фотографий говорит о том, что при обработке как алмазным выглаживанием, так И ультразвуковым поверхностным деформированием происходит сглаживание неровностей исходной поверхности. При этом применение УЗПД приводит к более полной обрабатываемого деформации слоя И обеспечивается формирование специфической микрогеометрии, имеющей регулярное ячеистое строение.

Топография поверхностей образцов из алюминиевого Д16Т исследуемых материалов приведены на рисунке 4.33.



a



б

Рисунок 4.33 — Топография образцов из алюминиевого сплава Д16Т ($P_{\rm CT}=60$ H, S=0,1 мм/об, $V_V=62,83$ м/мин): $a-{\rm AB};~6-{\rm У3}\Pi$ Д

Согласно рисункам 4.32-4.33 применение УЗПД обеспечивает более развитое состояние обрабатываемой поверхности, чем АВ. При этом наблюдается лучшее заполнение впадин профиля, сформированных на предыдущих этапах обработки. Микрогеометрия характеризуется наличием

более сглаженных впадин и выступов, что согласуется с данными, приведёнными ранее. На поверхности прослеживается наличие фрагментированной структуры, имеющей ячеистое строение, в отличии от полосчатой, характерной методу АВ.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

- применение УЗПД обеспечивает формирование микрогеометрического состояние поверхности с благоприятным сочетанием высотно-шаговых параметров;
- топография поверхности после ультразвуковой обработки обладает специфичным микрогеометрическим состоянием, имеющим ячеистое строение, не характерным для других методов ППД;
- в сравнении с AB применение УЗПД обеспечивает более интенсивное распределение материала, обуславливая лучшее заполнение впадин и регуляризацию формируемого рельефа.

4.5 Микроструктура поверхностного слоя

Процесс обработки металлов и сплавов сопровождается изменением их структурного состояния, а именно размера, направления и ориентации зёрен. Это объясняется силовым воздействием, оказываемым инструментом на поверхностный слой детали, приводящим к данным преобразованиям. Направление и изменение геометрических параметров зёрен в значительной зависят от направления сил резания или деформирования, воздействию которых подвергается поверхность детали в процессе её обработки. Изменение ориентации зёрен и плотности его распределения на единицу площади оказывает влияние на физико-механические И эксплуатационные параметры поверхностного слоя [17]. Определение влияния УЗПД по тангенциальной схеме на структурное состояние поверхностного слоя оценивалось путём анализа металлографических картин, полученных с помощью оптического микроскопа (рисунок 4.34-4.36).

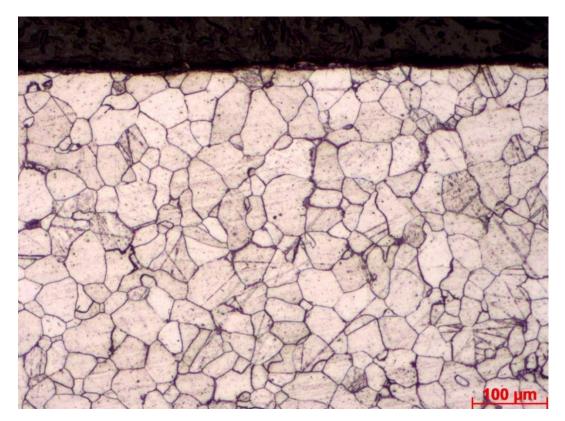


Рисунок 4.34 – Исходная структура стали 10895

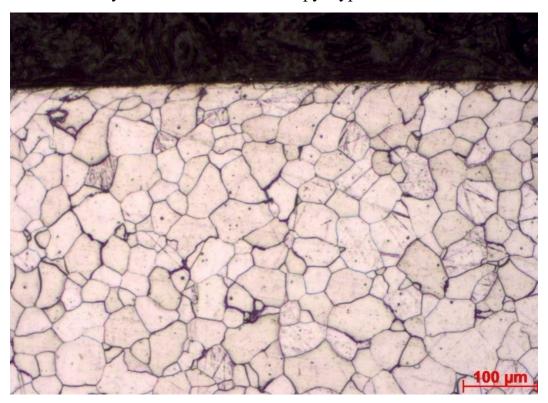


Рисунок 4.35 — Структура поверхностного слоя образца из стали 10895 после УЗПД по тангенциальной схеме

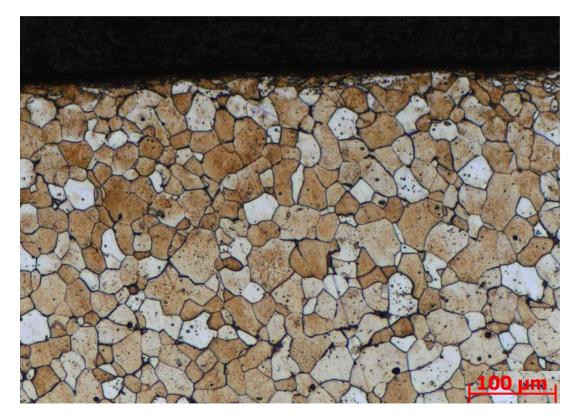


Рисунок 4.36 — Структура поверхностного слоя образца из стали 10895 после УЗПД по нормальной схеме

Из рисунков 4.34-4.36 видно, что после применение УЗПД привело к изменению зёренной структуры образцов из стали 10895. Из фотографий что после ультразвукового поверхностного пластического видно, деформирования формируется сложная структура с изменением ориентации зёрен обрабатываемого материала. Оценка плотности распределения зёрен в объёме оценивалось методом Салтыкова [96], основанном на подсчёте числа элементов на единицу площади. Согласно полученным данным, наблюдается прирост числа зёрен в поверхностном слое обработанного ультразвуковым деформированием образца (24,5 против 46,5 62 И при УЗПД тангенциальной и нормальной схеме соответственно), что должно привести к увеличению микротвёрдости [96].

Для определения влияния схемы УЗПД на глубину распространения деформации рассматривались структура образцов в отожжёном состоянии (рисунок 4.37-4.38).



Рисунок 4.37 — Структура поверхностного слоя образца из стали 10895 после УЗПД по тангенциальной схеме в отожжёном состоянии ($P_{\rm CT}=100~{
m H},\,S=0,1$ мм/об; $V_V=62,8~{
m m/muh}$)



Рисунок 4.38 — Структура поверхностного слоя образца из стали 10895 после УЗПД по нормальной схеме в отожжёном состоянии ($P_{\rm CT}=100~{
m H},\,S=0,1$ мм/об; $V_V=62,8~{
m м}/{
m ми}$)

Из изображений 4.37-4.38 видно, что глубина распространения деформации по рассматриваемым схемам УЗПД различна. Это указывает на то, что силовое воздействие инструмента на обрабатываемую поверхность изменяется, то есть зависит от схемы обработки. При этом наибольшая глубина распространения деформации наблюдается после УЗПД с вводом колебаний по нормали к обрабатываемой поверхности, что доказывает влияние кинематических особенностей различных схем УЗПД, описанных во второй главе, на глубину распространения деформации.

Применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования приводит к дроблению и переориентации зёрен. Из рисунка 4.35 видно, что после УЗПД наблюдается вытягивание зёрен относительно исходного состояния (см. рис. 4.34). С целью определения влияния УЗПД по тангенциальной схеме при различных значениях угла ввода колебаний проводились исследования продольных и поперечных сечений образцов (шлифы поверхности в поперечном и продольном сечении), на которых наблюдается изменение поведения материала, от значения угла β (рисунок 4.39, 4.40).

Исследуемые поверхности характеризуются выраженной ярко деформацией, заключающейся В вытягивании зёрен направлении пластической деформации. Углы ориентации зёрен определялись относительно направления главного движения (V_V) следующим образом:

- определялись зёрна с ярко выраженной направленностью пластической деформации, форма и грани которых напоминают эллипс (5 зёрен на образец);
- измерялись диагонали эллипса углы, формируемые наклоном большей диагонали зерна к направлению главной скорости обработки.

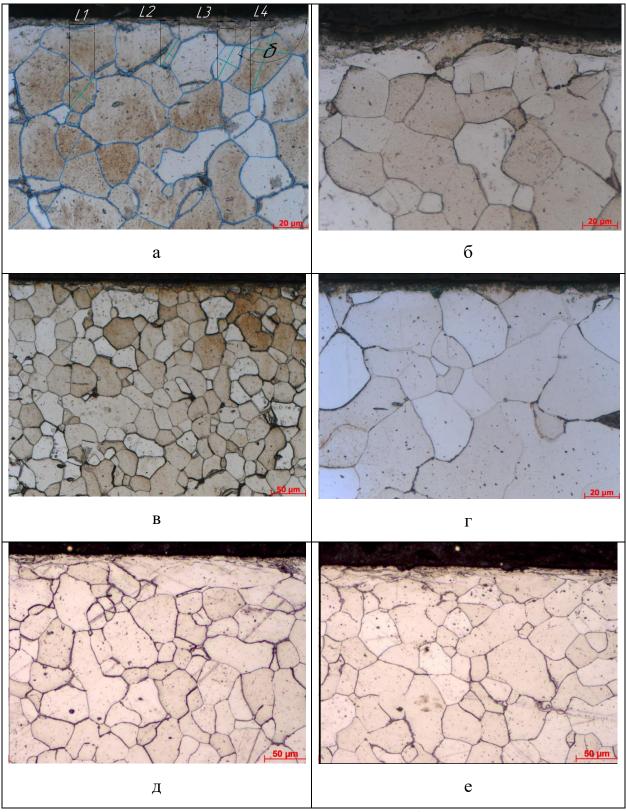


Рисунок 4.39 — Структура поверхностного слоя образцов из стали 10895 в поперечном сечении после УЗПД при различных углах β : а — β = 0°; δ — β = 15°; в — β = 30°; Γ — β = 45°; д — β = 60°; θ = 90°

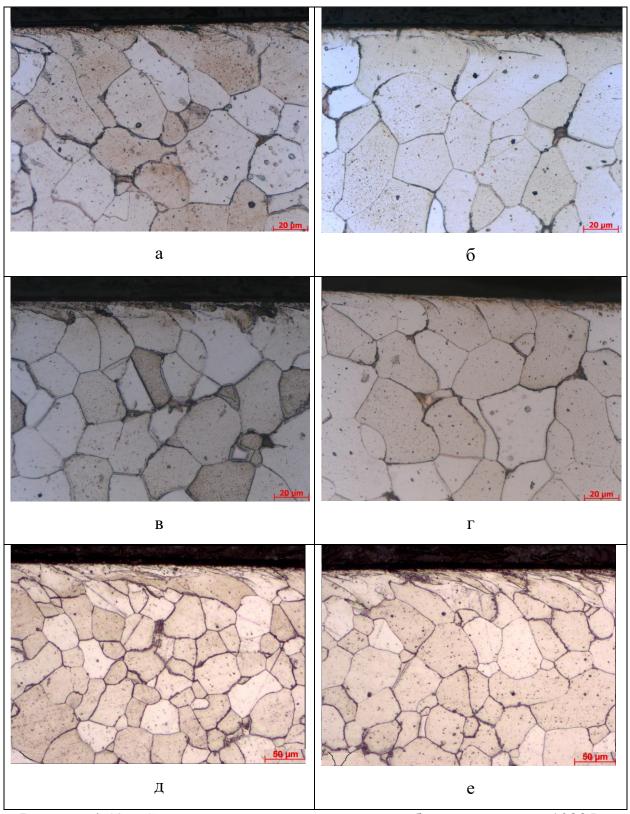


Рисунок 4.40 — Структура поверхностного слоя образцов из стали 10895 в продольном сечении после УЗПД при различных β : $a - \beta = 0^\circ$; $6 - \beta = 15^\circ$; $8 - \beta = 30^\circ$; $6 - \beta = 45^\circ$; $6 - \beta = 60^\circ$; $6 - \beta = 90^\circ$

Анализа рисунков 4.39-4.40 позволил выявить и определить направление деформации зёрен при различных значениях угла ввода колебаний, значения которых приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Превалирующее направление зёрен при УЗПД

Угол ввода	Угол наклона в	Угол наклона в	Результирующий
колебаний, β , $^{\circ}$	продольном	поперечном	угол наклона, $\delta_{ ext{P}}$,
	сечении, $\delta_{\Pi P}$, $^{\circ}$	сечении, $\delta_{\Pi \Pi \Pi}$, $^{\circ}$	0
0	54	56	66
15	49	62	57
30	48	52	49
45	41	50	51
60	39	38	52
90	38	36	48

Значение результирующего угла наклона зёрен определялось рассмотрением пространственного расположения зёрен (с учётом их направленности и длины) с продольного и поперечного сечений на виде с верху (рисунок 4.35). При этом руководствовались следующим алгоритмом:

- проецирование большего размера зерна на плоскость главного движения (определение её длины на виде с верху);
- взаимный перенос спроецированных с различных сечений размеров зерна на плоскость, и построение длины и направления зерна при виде с верху;
- определение значения угла, между результирующим зерном и направлением главной скорости обработки (рисунок 4.41).

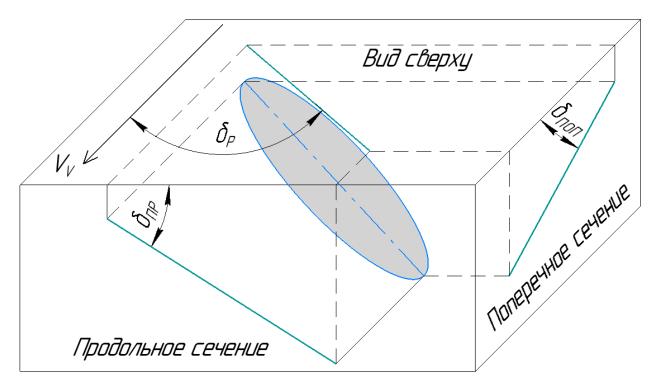


Рисунок 4.41 — Расположение зерна в пространстве

Графическая интерпретация данных таблицы 4.3 приведена на рисунке 4.42.

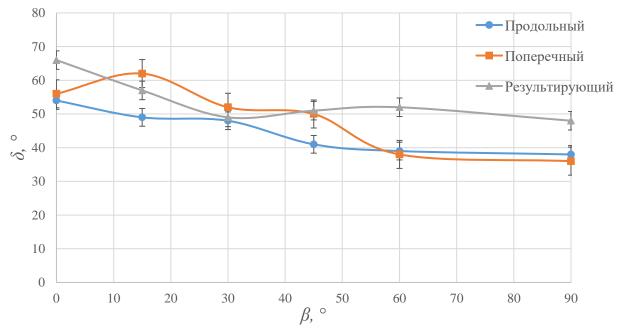


Рисунок 4.42 — Изменение превалирующего направления деформации зёренной структуры образцов из стали 10895 после УЗПД при различных значениях угла β

Из рисунка 4.42 видно, что варьирование значением угла ввода колебаний β относительно вектора главной скорости сопровождается изменением

направления действия деформационного усилия. Вследствие ЭТОГО наблюдается переориентация зёрен, заключающаяся как в изменении их формы, так и расположения. Можно заметить, что увеличение угла β сопровождается постепенным уменьшением рассматриваемых УГЛОВ большинства зёрен в поверхностном слое практически во всех сечениях. В случае с наклоном зёрен в поперечном сечении, то наблюдается некоторое увеличение $\delta_{\Pi \Pi \Pi}$ при значении $\beta = 15^{\circ}$, с дальнейшим уменьшением. Данные особенности направления зёрен можно объяснить изменением направления движения инструмента, что соотносится с теоретическим описанием процесса УЗПД по тангенциальной схеме приведённым во второй главе.

С помощью металлографических исследований была определена глубины и степень деформации поверхностного слоя (таблица 4.4). Глубина оценивалась путём определения наибольшего расстояния между поверхностью и зёрнами, отличающимися от зёренной структуры основного материала. Степень деформации определялась следующим образом:

Каждое расчетное зерно было условно принято за эллипсис, а исходная форма зерна за окружность (рисунок 4.43).

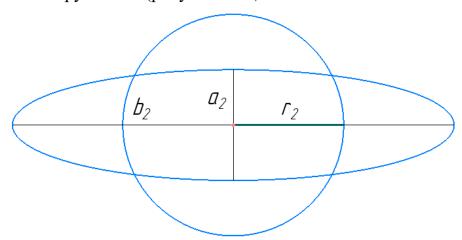


Рисунок 4.43 – Размеры зерна

Таким образом для расчета степени деформации ($\varepsilon_{\rm Д}$) применялись следующие формулы:

Площадь эллипса:

$$S_{9} = \pi \cdot a_{2} \cdot b_{2} \tag{4.7}$$

Площадь окружности:

$$S_{OKP} = \pi \cdot r_2^2 \tag{4.8}$$

Радиус исходной окружности:

$$\pi \cdot a_2 \cdot b_2 = \pi \cdot r_2^2 \tag{4.9}$$

$$r_2 = \sqrt{a_2 \cdot b_2} \tag{4.10}$$

Степень деформации оценивалась выражением:

$$\varepsilon_{\mathcal{A}} = \frac{a - 2r_2}{2r_2} \tag{4.11}$$

Таблица 4.4 – Глубина и степень деформации

Угол ввода	Глубина деформации,	Степень деформации,
колебаний, β , $^{\circ}$	MKM	$arepsilon_{\mathcal{I}},$ %
0	275	36,5
15	279	34,8
30	268	34,8
45	253	32,5
60	287	37,1
90	298	37,4

Наличие данных о глубине деформации и её степени косвенно указывает на изменение механических свойств поверхностного слоя. На основе приведённых данных можно предположить, что поверхностный слой будет характеризоваться повышенным значением микротвёрдости от поверхности, на глубину до 300 мкм, после применения УЗПД. Данные по степени деформации позволяют предположить, что наибольший прирост микротвёрдости будет наблюдаться при $\beta = 0$, 60 и 90°.

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

- схема ввода колебаний относительно обрабатываемой детали оказывает влияние на изменение силового воздействия, оказываемого инструментом на деформируемую поверхность;
- применение УЗПД приводит к модификации микроструктуры поверхностного слоя обрабатываемого материала, заключающейся в изменении направленности, формы и плотности зёрен;
- поверхностный слой после ультразвукового поверхностного пластического деформирования характеризуется повышенной плотностью зёрен на единицу площади, на основании чего можно сделать предположение об увеличении микротвёрдости обработанных материалов;
- варьирование угла ввода колебаний относительно вектора главной скорости при УЗПД по тангенциальной схеме приводит к изменению направленности зёрен, которое оценивалось углами $\delta_{\Pi P}$, $\delta_{\Pi O\Pi}$, δ_{P} . При этом наблюдается уменьшение значения данных углов при увеличении β от 0 до 90°, что согласуется с данными, представленными во второй главе данной работы;
- глубина распространения деформации при обработке стали 10895 на рассматриваемых режимах составляет около 300 мкм, на основании чего можно предполагать повышение микротвёрдости поверхностного слоя, относительно основной массы материала, на эту глубину.

Выводы по 4 главе

- 1. Экспериментально показано, что применение УЗПД по тангенциальной схеме обеспечивает формирование регулярного микрогеометрического состояния поверхности, характеризующегося ячеистым строением (с плотностью элементов до 1000 на 1 мм² и более), с регулируемым сочетанием значений высотных и шаговых параметров.
- 2. На основании металлографических исследований установлено, что смена направления ввода колебаний относительно обрабатываемой детали оказывает влияние на изменение глубины распространения деформации в поверхностном слое (глубина деформации в поверхностном слое образцов из стали 10895 при УЗПД по нормальной схеме 317, УЗПД по тангенциальной схеме 231, на режимах $P_{\rm CT}=100~{\rm H},~S=0,1~{\rm mm/o6};~V_V=62,8~{\rm m/muh},~A=12~{\rm mkm},~f=20~{\rm kFu},~r_1=4~{\rm mm}).$
- 3. Экспериментально показана граница области допустимых режимов по величине статического нагружения, за пределами которой наблюдается рост волнистости поверхности, характеризующаяся уменьшением опорной длины профиля при превышении прилагаемой нагрузки выше критического значения, которая для алюминиевых сплавов Д16, Д16Т, стали 10895, латунного сплава Л68 составляет 80, 100, 120 и 160 Н соответственно (при радиусе инструмента $r_1 = 4$ мм).
- 4. При обработке деталей с номинальными размерами в диапазоне от 30 до 50 мм с исходными высотными параметрами шероховатости Ra = 0.85 мкм, Rz = 5.66 мкм обеспечивается снижение шероховатости более чем в 3 раза, до уровня Ra = 0.2 мкм Rz = 1.67 мкм, приводящее к изменению размера детали в пределах до 4 мкм, что составляет менее 30% от допуска на данный диапазон размеров по 5 квалитету, и позволяет применять УЗПД по тангенциальной схеме без назначения дополнительного припуска на обработку.
- 5. Анализ выявленного металлографического строения поверхностного слоя показал, что применение УЗПД по тангенциальной схеме приводит к

изменению микроструктуры поверхностного слоя обрабатываемого материала, заключающемуся в повышении плотности зёрен на единицу объёма в 2,5 раза, возникновении направленной деформации зёрен со степенью до 37,4 %, на глубину до 298 мкм (для материала 10895 на режимах $P_{\rm CT} = 120~{\rm H}, S = 0,1~{\rm mm/o6}; V_V = 62,8~{\rm m/muh}, A = 12~{\rm mkm}, f = 20~{\rm k\Gamma II}, r_1 = 4~{\rm mm}$).

- 6. Экспериментально подтверждено, что угол между векторами скорости главного движения и колебательной скорости β является технологическим параметром УЗПД по тангенциальной схеме изменяющим направление течения материала, оказывающим влияние на параметры волнистости, шероховатости и микроструктурное состояние поверхностного слоя обрабатываемых образцов:
- увеличение угла β от 0 до 45° сопровождается ростом высотных параметров шероховатости и волнистости, в диапазоне значений угла β от 45 до 90° наблюдается обратная тенденция, при значениях β близким к 90° формируется состояние поверхности сопоставимое с достигаемым при $\beta = 0$ ° (при оптимальных параметрах процесса УЗПД по тангенциальной схеме).
- влияние изменения угла β на значения шаговых параметров волнистости и шероховатости носит линейный характер (максимальные значения указанных параметров наблюдаются при $\beta = 90^{\circ}$).
- 7. Получены регрессионные зависимости в виде уравнений пятого порядка, позволяющих прогнозировать итоговые значения параметров шероховатости Ra и Sm в диапазонах изменения статического усилия $P_{\rm CT}$ от 20 до 120 H, подачи S от 0,07 мм до 0,13 мм, угла β от 0 до 90° при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании деталей из алюминиевого сплава Д16Т.

ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УЗПД ПО ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СХЕМЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Предыдущий раздел посвящен установлению влияния режимов УЗПД на особенности формирования геометрического состояния поверхностного слоя. Поскольку эксплуатационные свойства рабочих поверхностей зависят как от микрогеометрического, так и физико-механического состояния, то определение их взаимосвязи вызывает большой научный и практический интерес. Влияние УЗПД на механические и эксплуатационные свойства рассматривается в данном разделе.

5.1 Твёрдость и микротвёрдость

Твёрдость и микротвёрдость являются важными механическим свойствами поверхностного слоя, характеризующих способность материала сопротивляться деформации. Эти параметры оказывают влияние на следующие эксплуатационные свойства рабочих поверхностей — прочность, контактную жёсткость, износостойкость, усталостную выносливость и коррозионную стойкость.

При назначении режимов УЗПД выбор оптимального значения статического нагружения в значительной степени зависит от исходной твёрдости обрабатываемого материала. Для определения значений $P_{\rm CT}$ при которых наблюдается максимальный прирост микротвёрдости для исследуемых материалов была проведена серия экспериментов, при различных значениях статического нагружения, с анализом изменения параметров твёрдости и микротвёрдости. Исходная твёрдость материалов:

Д16 - HB31 = 310 MПа

Д16T - HB65 = 650 MПа

Сталь 10895 - HB125 = 1250 MПа

Л68 - HB150 = 1500 MПа

Оценка твёрдости проводилась методом Бринелля, путём вдавливания твердосплавного шарика диаметром 5 мм при нагрузке 1,225 кН в

исследуемую поверхность. После обработки образцов прирост твёрдости в большинстве случаев составил 1...3 единицы. Данную закономерность можно объяснить тем, что толщина упрочнённого слоя значительно меньше глубины вдавливания деформатора. На основании этого определение оптимального значения статической силы для каждого материала определялось с помощью изменения микротвёрдости.

Микротвёрдость определялась методом Виккерса путём вдавливания алмазной пирамидки. При этом усилие вдавливания значительно меньше, чем обработки исследовании твёрдости. Режимы ДЛЯ обеспечения наибольшего эффекта упрочнения установлены на основании теоретических и экспериментальных данных величина подачи назначалась S = 0,1 мм/об из условий обеспечения низкой высоты микронеровностей в направлении $ar{\mathcal{S}}$ и УЗПД. Скорость достаточной производительности процесса детали основе математических зависимостей образования устанавливалась на микрогеометрии от технологических параметров из условия обеспечения продольной шероховатости, не превышающей поперечную ($V_V = 62,83$ м/мин для Д16, 10895, Л68 и $V_V = 70,68$ м/мин для Д16Т). Статическое усилие $P_{\rm CT}$ варьировалось в пределах от 20 до 120 Н для материалов Д16 и Д16Т, и от 20 до 160 Н для стали 10895 и Л68. Результаты изменения микротвёрдости образцов приведены на рисунках 5.1-5.4 (см. прил. В, П.3).

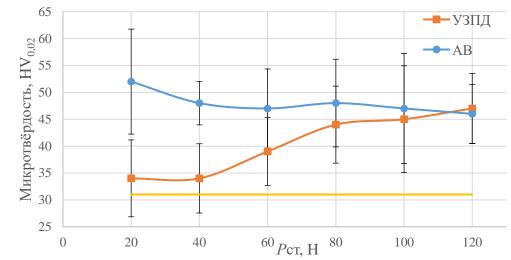


Рисунок 5.1 – Изменение микротвёрдости образцов из Д16 от $P_{\rm CT}$

Из рисунка 5.1 видно, что изменение прилагаемой нагрузки приводит к изменению микротвёрдости образцов. Так для материала Д16 увеличение статической нагрузки от 20 H до 120 H при УЗПД приводит к монотонному росту деформационного упрочнения поверхности в исследуемом диапазоне (40 %). В диапазоне $P_{\rm CT}$ от 20 до 40 H, вероятно, тепловые факторы превалируют над силовыми, что обуславливает интенсивное протекание релаксационных процессов и сдерживает прирост микротвёрдости. В тоже время увеличение нагрузки при АВ приводит к снижению упрочняющего эффекта.

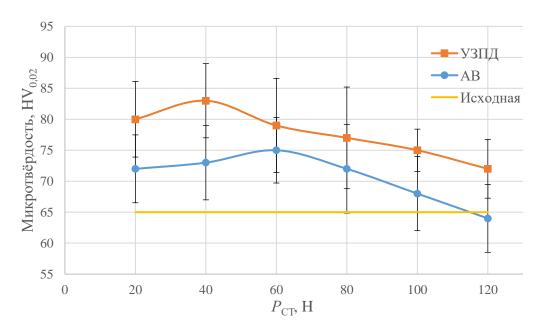


Рисунок 5.2 – Изменение микротвёрдости образцов из Д16Т от $P_{\rm CT}$

В случае с Д16Т применение У3ПД приводит к увеличению микротвёрдости 45 % (рисунок 5.2). При увеличении нагрузки до 40 Н поверхностный слой упрочняется, после чего значение микротвёрдости начинает уменьшаться с возрастанием усилия деформирования. Также стоит отметить, что процесс У3ПД приводит к большему упрочнению поверхности, по сравнению с АВ.

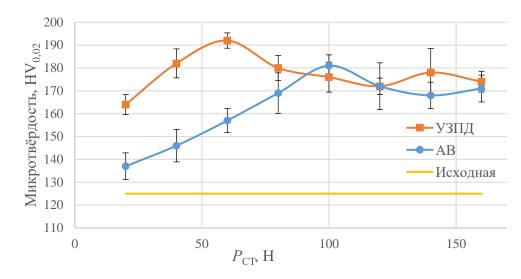


Рисунок 5.3 – Изменение микротвёрдости образцов из стали 10895 от $P_{\rm CT}$

Изменение микротвёрдости для стали 10895 имеет экстремальную зависимость (рисунок 5.3). Наблюдается прирост микротвёрдости после УЗПД при увеличении нагрузки до 60 H (увеличение на 53 %) с уменьшением значения микротвёрдости при дальнейшем росте нагрузки. Применение AB также оказывает экстремальное влияние на упрочнение поверхности, достигая максимального прироста в 44 % при нагрузке 100 H. Стоит отметить, что максимальное значение микротвёрдости в случае УЗПД достигается при меньшем значении $P_{\rm CT}$, чем у AB. Снижение значений микротвёрдости при увеличении нагрузки за точку экстремума обусловлено чрезмерным нагружением, ведущим к переупрочнению поверхности.

Для материалов с твёрдостью ниже 1500 МПа значение рациональной нагрузки подчиняется зависимости

$$P_{CTepah} = \frac{HB}{K_{HB}} \tag{5.1}$$

где HB — твёрдость обрабатываемого материала, K_{HB} — эмпирический коэффициент пропорциональности, для материалов с твёрдостью от HB50 до HB150 - $K_{HB} \approx 1,55$, при $r_1 = 4$ мм.

В случае с Л68 (см. рис 5.4) наблюдается устойчивый прирост микротвёрдости как при УЗПД, так и при АВ. В исследуемом диапазоне параметров максимальный прирост наблюдается при $P_{\rm CT}=160$ Н. При этом

применение ультразвука приводит к большему упрочнению (57% против 34%).

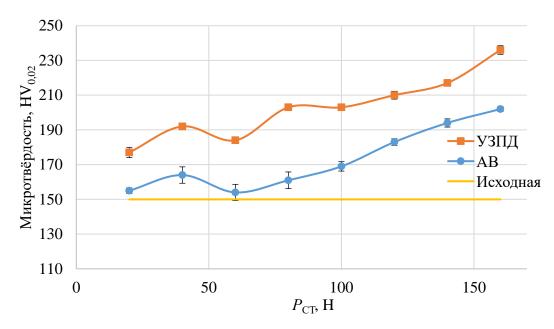


Рисунок 5.4 – Изменение микротвёрдости образцов из Л68 от $P_{\rm CT}$

Для определения влияния наложения следов обработки на прирост микротвёрдости определялось изменение микротвёрдости образцов из Д16 и Д16Т при различных значениях подачи S (рисунок 5.5-5.6).

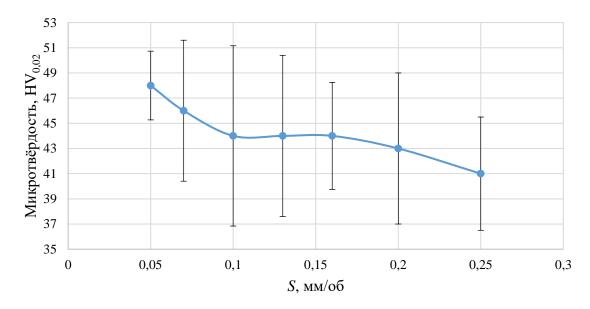


Рисунок 5.5 – Изменение микротвёрдости образцов из Д16 при различных значениях $S\left(P_{\mathrm{CT}}=80\;\mathrm{H}\right)$

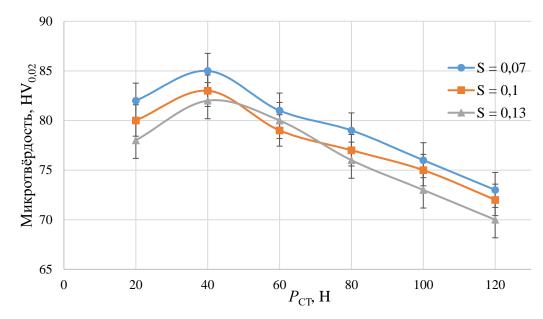


Рисунок 5.6 – Изменение микротвёрдости образцов из Д16Т при различных значениях S

Согласно рисункам 5.5-5.6 увеличение подачи *S* обеспечивает меньшее упрочнение. Это доказывает гипотезу о том, что при повторном наложении следов обработки происходит дополнительное воздействие на обрабатываемую поверхности, приводящее к дополнительному приросту микротвёрдости. Стоит отметить, что это увеличение не значительно, и составляет 18 % в случае с Д16 и 5 % в случае с Д16Т в заданном диапазоне технологических режимов.

Также в работе рассматривалось влияние угла ввода колебаний β на изменение микротвёрдости. Исследования проводились на образцах из стали 10895 на режимах $V_V = 62,83$ м/мин, S = 0,1 мм/об, $P_{\rm CT} = 100$ H (рисунок 5.7).

Согласно данным, приведённым на рисунке 5.7 применение УЗПД позволяет достичь большего эффекта упрочнения при определённых угла β . Кривая измерения микротвёрдости имеет не монотонный характер с пиками при $\beta=0,\ 60,\ 90^\circ$ и минимальными при 45°. Эти данные коррелируют с зависимостью изменения высотных параметров шероховатости и волнистости поверхности от изменения β .

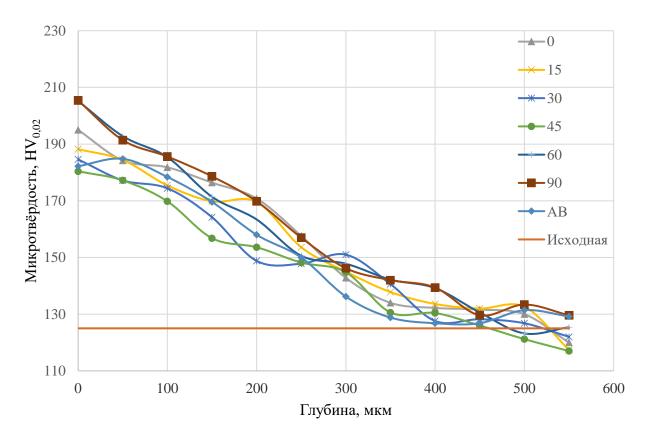


Рисунок 5.7 — Распределение микротвёрдости по глубине при различных значениях угла β

Кроме этого, заметен градиент уменьшения микротвёрдости по глубине, исходный уровень которой наблюдается при удалении от поверхности более чем на 500 мкм. На основании полученных данных можно сделать предположение о том, что износостойкость поверхности после УЗПД при $\beta = 90$ будет наилучшей. Полученные данные согласуются с результатами измерения глубины распространения деформации.

Исходя из вышесказанного можно сделать предположение о том, что УЗПД применение позволяет повысить микротвёрдость деталей, из различных металлов и сплавов, a также является выполненных конкурентноспособным по сравнению с методом АВ. Угол ввода колебаний влияет на изменение микротвердости и подчиняется той же закономерности, характерной для зависимости высотных параметров шероховатости и волнистости от изменения β .

5.2 Остаточное напряжённое состояние поверхностного слоя после ультразвукового упрочняюще-чистового деформирования

Характер напряжённого состояния поверхностного слоя оказывает существенное влияние на работоспособность деталей, особенно в условиях знакопеременных нагрузок [77]. Имеющиеся данные по состоянию после УЗПД по схеме с вводом колебаний по нормали к обрабатываемой поверхности свидетельствует о формировании в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия [21].

Исследования характера распределения, уровня и глубины залегания тангенциальных остаточных напряжений (σ_{τ}) проводились методом Давиденкова на кольцах. Непрерывное снятие напряжённых слоёв с образцов осуществлялось электрохимическим путём с автоматической регистрацией деформации при помощи тензодатчика.

Для сравнения образцы из Д16Т обрабатывались У3ПД и AB на режимах $V_V = 70,68$ м/мин, S = 0,1 мм/об, $P_{\rm CT} = 50$ H.

Анализ эпюр σ_{τ} показал, что применение УЗПД по тангенциальной схеме формирует в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия (рисунок 5.8). Уровень остаточных напряжений сжатия образцов y ультразвукового поверхностного пластического деформирования тангенциальной схеме уменьшается при увеличении β от 0 до 45°, а дальнейшее увеличение угла ввода колебаний относительно вектора главной скорости приводит к увеличению σ_{τ} с максимумом при $\beta = 90^{\circ}$: $\sigma_{\tau} = -360 \text{ M}\Pi \text{a}$ (выше чем у AB σ_{τ} = - 180 MПа). Это связано с тем, что направление движения деформирующего инструмента изменяется относительно V_V приближении β к 45° наблюдается их самое неблагоприятное соотношение, уменьшающее уровень тангенциальных остаточных напряжений.

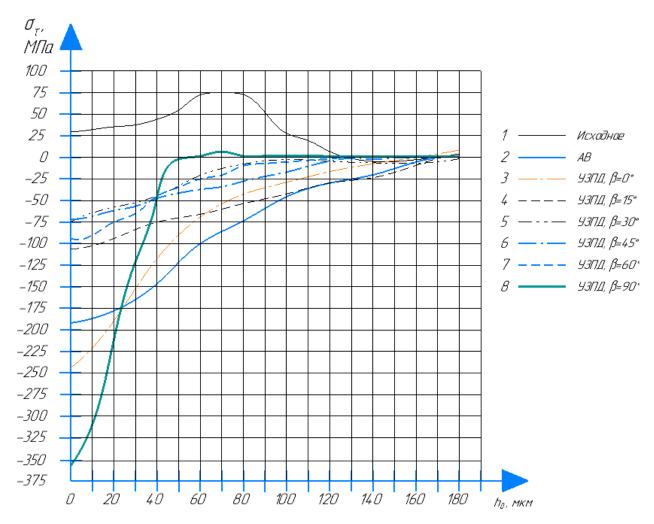


Рисунок 5.8 — Распределение тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое: 1 — исходное; 2 — AB; 3-8 — $У3\PiД$ по тангенциальной схеме β = 0, 15, 30, 45, 60, 90°

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что использование УЗПД по тангенциальной схеме (при $\beta=90^\circ$) позволяет формировать различные по величине и глубине остаточные напряжения по сравнению с методом АВ (на аналогичных режимах σ_{τ} = - 360 МПа и σ_{τ} = - 180 МПа соответственно). На примере изменения угла ввода колебаний видно, что распределение и величина остаточных напряжений зависит от технологических параметров обработки и процесс их формирования является управляемым.

5.3 Износостойкость поверхности

Согласно литературным данным около 80% выхода из строя машин в процессе эксплуатации связано с износом в сопряжениях узлов трения. На

основании этого можно сделать вывод о том, что износостойкость является одним из важнейших свойств, определяющим качество поверхности указанных приборов и машин.

Испытания на износостойкость в условиях трения скольжения проводились по схеме "диск-колодка". Диски выполнялись из латунного сплава Л68, колодка из стали 45. Испытания проводились на машине трения ИИ 5018. Оценка износа осуществлялась изменением линейного размера (глубины) пояса трения. Ввиду того, что глубина деформированного слоя составляет около 150 мкм, основное внимание было уделено процессу приработки детали, в ходе которого и проводилась оценка износостойкости. Контроль линейного износа осуществлялся путём снятия профилограмм "исходная поверхность — изношенная поверхность" на профилографе *MarSurf PS10*.

Испытания проводились на серии образцов, поверхности которых были подготовлены различными методами — шлифованием, алмазным выглаживанием, УЗПД (2 режима). Исходное микрогеометрическое состояние исследуемых поверхностей имело следующие значения Ra = 0,1...0,3 мкм, Sm = 50...80 мкм, $t_P = 90...99$ %.

Сравнительное исследование износостойкости осуществлялось после проведения УЗПД и АВ при следующих режимах обработки: $P_{\rm CT}=160$ H, S=0,1 мм/об, V=62,83 м/мин, $\beta=0;90^{\circ}$ (для УЗПД по тангенциальной схеме). Подготовка образцов с различными значениями угла ввода колебаний проводилась для определения влияния β на износостойкость поверхности.

По результатам экспериментов были построены кривые линейного износа образцов от времени испытаний (рисунок 5.9), анализ которых показал, что величина износа образцов, подвергнутых УЗПД на исследуемых режимах на всех стадиях испытания меньше, чем у шлифованной и выглаженной поверхности. Также из графиков видно, что приработка у обработанных ультразвуком поверхностей происходит при меньшем линейном износе, что

говорит о хорошей структурной приспосабливаемости к условиям трения. Применение УЗПД привело к уменьшению линейного износа на 60%, по сравнению с шлифованной поверхностью.

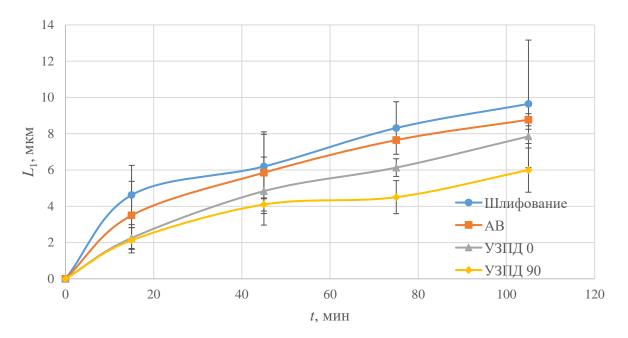


Рисунок 5.9 – Зависимость линейного износа образцов (L_1) от времени испытания

Также в процессе износа определялась величина коэффициента трения (рисунок 5.10).

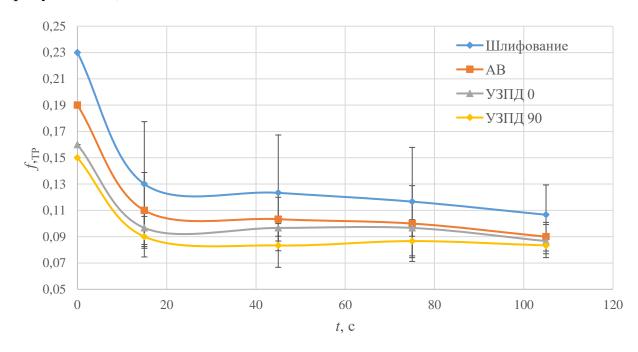


Рисунок 5.10 – Зависимость коэффициента трения от времени испытания

Из рисунка 5.10 видно, что значение коэффициента трения у образцов, обработанных УЗПД в начале изнашивания меньше, чем у поверхностей, подготовленных шлифованием и алмазным выглаживанием. По мере изнашивания наблюдается уменьшение коэффициента трения у всех образцов, которое стремится к значению $f_{TP} = 0.083$, что говорит о прирабатываемости и стремлению к установлению равновесного микрогеометрического состояния контактируемых поверхностей. По значениям кривой, соответствующей шлифованным образцам, можно сделать вывод о том, что процесс приработки ещё не завершён, в то время как для остальных образцов наблюдается равное значение коэффициента трения после 105 изнашивания. Также из графика видно, что изменение угла ввода колебаний оказывает влияние на значение коэффициента трения и величину линейного износа. Вероятнее всего это связано с изменением ориентации зёрен в поверхностном слое изнашиваемых образцов, что может говорить о совокупности воздействия микрогеометрического и физико-механического состояния. При значении $\beta = 90^\circ$ зёрна ориентированы под большим углом, относительно направления движения, что приводит к замедлению процесса износа.

На основе полученных данных можно предположить, что изменение угла ввода колебаний с 0 на 90° привело к дополнительному приросту микротвёрдости, что соотносится с износостойкостью модифицированной поверхности.

Исходя вышесказанного ИЗ ОНЖОМ сделать вывод использование УЗПД по тангенциальной схеме в качестве финишного метода позволяет формировать поверхностный слой c повышенной износостойкостью, по сравнению с шлифованием и АВ. Кроме того установлено, что варьирование значением угла β оказывает влияние на износостойкость поверхности.

5.4 Определение деформационных характеристик поверхностей после ультразвукового поверхностного пластического деформирования

Работоспособность деталей машин, работающих в условиях переменного нагружения, определяется усталостной прочностью [14]. Данное свойство зависит от состояния поверхностного слоя изделия, в частности от знака, величины и глубины залегания технологических остаточных напряжений и его микротвёрдости.

Определение деформационных характеристик проводилось на гладких образцах прямоугольного сечения, изготовленных из листа алюминиевого сплава Д16Т (рисунок 5.11). Для получения однородных свойств по сечению рабочей части образцы подвергались размерному химическому травлению с целью удаления плакирующего слоя и части основного материала.

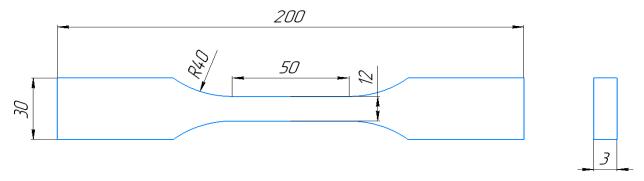


Рисунок 5.11 – Образец для определения деформационных характеристик

Испытаниям подвергались образцы после шлифования, алмазного выглаживания и УЗПД по тангенциальной схеме. Испытания проводились по методике отнулевого цикла с увеличивающейся амплитудой напряжений на каждом цикле, результаты исследования которых приведены на рисунках 5.12-5.14 [49].

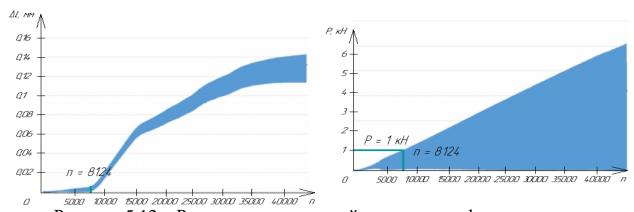


Рисунок 5.12 — Результаты испытаний по оценке деформационных характеристик образов после шлифования; Δl — деформация образца, мм

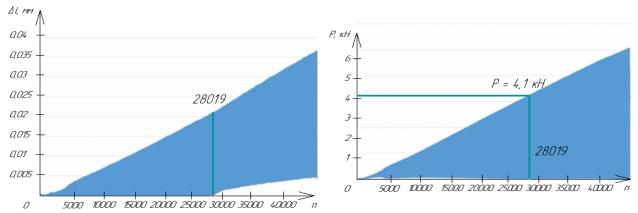


Рисунок 5.13 — Результаты испытаний по оценке деформационных характеристик образцов после AB

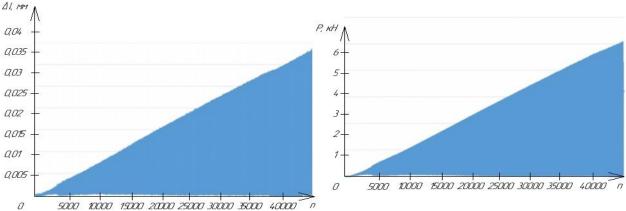


Рисунок 5.14 — Результаты испытаний по оценке деформационных характеристик образцов после УЗПД

Анализ графиков позволил установить, что разделение областей упругой и пластической деформации образцов после шлифования наблюдается после 8124 циклов (при нагрузке 1 кН). В случае с образцами после АВ и УЗПД заметно смещение границы перехода этих областей в сторону увеличения

нагрузки и циклов нагружения. В случае с алмазным выглаживанием начало зоны пластической деформации наблюдается при достижении 28019 циклов (при нагрузке 4,1 кН), а после УЗПД в исследуемом диапазоне не наблюдается (45 тыс. циклов и нагрузки более 6 кН). На основании этого можно предположить, что при определённом значении нагрузки разрушение образца после ультразвукового поверхностного пластического деформирования произойдёт позднее, чем после других представленных технологических методов. Поскольку для многих деталей, в частности применяемых в авиационной технике, критерием исчерпания работоспособности является появление пластической деформации [85], то образцы обработанные УЗПД по тангенциальной схеме имеют более высокую работоспособность в условиях образцами переменного нагружения ПО сравнению c обработанных шлифованием и АВ. Полученные данные косвенно указывают на повышение деформационных (в 5 и более раз, сравнивая количество циклов по заданной программе, при которых начинается пластическое деформирование образца) и усталостных характеристик (сопротивлению циклического нагружения) деталей после методов ППД, а наибольший прирост наблюдается после применения УЗПД.

Полученные данные коррелируют с представленной информацией по остаточным технологическим напряжениям (наибольшей величиной и глубиной остаточных напряжений сжатия обладают образцы после ультразвуковой обработки).

На основании полученных данных можно говорить о том, что применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования может повысить усталостные свойства обрабатываемых деталей.

5.5 Рекомендации по применению УЗПД по тангенциальной схеме при обработке деталей из пластичных металлов и сплавов

Проектирование технологической операции ультразвукового поверхностного пластического деформирования по тангенциальной схеме при

обработке деталей из цветных металлов и сплавов следует проводить в следующем порядке:

- 1. Определить исходные параметры поверхности, геометрии и материала обрабатываемой детали (высотные параметры шероховатости Ra, Rz, Rmax, Rp, твёрдость HB, модуль Юнга E, модуль Пуассона μ , D диаметр обрабатываемой поверхности).
- 2. Определить по конструкторской документации требуемые итоговые значения параметров $Ra_{\text{обр}}$, $Rz_{\text{обр}}$, $Sm_{\text{обр}}$ обработанной поверхности.
 - 3. Определить величину статического усилия P_{CT} в следующем порядке: 3.1.Определить величину глубину внедрения инструмента $h_{\partial} = Rz_{\text{UCX}}$, минимально необходимую выполнения условия ($h_{\partial} \geq Rz_{\text{UCX}}$) формирования полностью нового микрорельефа.
 - 3.2. Рассчитать глубину абсолютного вдавливания при статическом нагружении $t_{\rm CT}$ по формуле:

$$t_{CT} = \frac{h_o}{\left(2\sqrt{1 + f_{mp}^{2}}^{\frac{1}{\nu}}\right) \cdot K_h}$$

где $f_{\rm rp}$ – коэффициент трения между инструментом и обрабатываемой поверхностью, K_h – коэффициент влияния УЗК на глубину отпечатка $(1,13 \le K_h \le 1,31)$, v – константа, зависящая от метода обработки, при

$$\Pi\Pi\Pi\Pi v = 1, 1 \left(\frac{Rp}{Ra}\right) - 1;$$

3.3.Рассчитать диаметр отпечатка d из выражения:

$$d = \sqrt{D_1^2 - (D_1 - 2t_{CT})^2}$$

где D_1 – диаметр инструмента

3.4. Рассчитать $P_{\rm CT}$:

$$P_{CT} = \frac{\pi D_1 \left(D_1 - \sqrt{D_1^2 - d^2} \right) HB}{2}$$

где НВ твёрдость обрабатываемого материала по Бринеллю

- 3.5. Проверить полученное значение P_{CT} на выполнение граничных условий обработки:
- по предотвращению образования волнистости

$$P_{\rm CT} < P_{\rm KPHT} (P_{\rm KPHT} = 0.0041 HB^2 - 0.153 HB + 84.44)$$

- по предотвращению переупрочнения поверхности $P_{\text{CT}} \leq P_{\text{СТгран}}$:

$$P_{CTrpah} = \frac{HB}{K_{HB}}$$

 K_{HB} — эмпирический коэффициент пропорциональности, для материалов с твёрдостью от HB50 до HB150 - $K_{HB} \approx 1,55$, при $r_1 = 4$ мм.

- 4. Рассчитать ширину отпечатка b_1 в следующем порядке
 - 4.1. Рассчитать площадь отпечатка с учётом исходного микрогеометрического состояния поверхности $A_{\Pi P}$:

$$A_{IIP} = \frac{1}{2} A_C b \varepsilon_k^{\nu} \left[1 + 0.9 \nu (\nu - 1) k_2 \left(\frac{R_H}{h_o} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{HB}{E} \right)^{\frac{1}{3}} (1 - \mu^2)^{\frac{1}{3}} \varepsilon_k^{-\frac{1}{6}} \right] K_S$$

где A_C — контурная площадь (для поверхности имеющей только шероховатость $A_C = Ar_{\rm I}$);

 $Ar_{\rm Д}$ – фактическая площадь при скольжении: $Ar_{\rm Д} = Ar_{\rm CT}\sqrt{1+f_{\rm TP}^{2}}$;

 $Ar_{\rm CT}$ — фактическая площадь контакта при статическом вдавливании

$$Ar_{CT} = \frac{P_{CT}}{HB};$$

 $b, \ v$ — константы относительной опорной длины профиля после

обработки со снятием стружки
$$b = 0.5 \left(\frac{R \max}{Rp}\right)^v$$
, $v = \frac{Rp}{Ra} - 1$;

Rmax, Rp, Ra — высотные параметры шероховатости поверхности; ε_k — величина отношения расстояния от вершины самой высокой неровности до рассматриваемого сечения к высоте самой высокой неровности;

 $R_{\rm H}$ — радиус лунки отпечатка $R_{\rm H} = \frac{0.25d^2 + w^2}{w}$;

w – величина упругого восстановления

$$w = 1.3R_H^{\frac{1}{3}}h_o^{\frac{2}{3}} \left(\frac{HB}{E}\right)^{\frac{2}{3}} \left(1 - \mu^2\right)^{\frac{2}{3}};$$

 K_S – коэффициент влияния УЗК на площадь отпечатка (1,15 \leq K_S \leq 1,34);

 k_2 – коэффициент учитывающий свойства материала инструмента

$$k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}$$
 (μ_2 , E_2 — коэффициенты Пуассона и Юнга материала

инструмента).

4.2. Рассчитать ширину следа b_1 :

$$b_1^2 + 2r_{y_II}b_1 - \frac{8A_{IIP}}{\pi} = 0$$

где $r_{\rm УП}$ – длина восстановленного участка $r_{\rm УП} = \sqrt{1,3R_{\rm H}w}$

5. Рассчитать ширину коридора следа K, при значениях A=12 мкм и $\beta=60^\circ$

$$K = b_1 + 2A\sin\beta$$

где A — амплитуда колебаний, β — угол ввода колебаний инструмента относительно вектора главной скорости.

6. Рассчитать подачу инструмента *S*:

$$S = 2\sqrt{{R_{H}}^{2} - \left(RZ_{oбp} - R_{H}\right)^{2}}$$

- 7. Назначить максимальное значение скорости главного движения V_V в диапазоне 30 250 м/мин, с учётом жёсткости системы СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь).
- 8. Определить дробную часть m отношения времени одного оборота детали к длительности периода колебаний инструмента:

$$m = \frac{60f}{n} - M$$

где M — целое количество периодов колебаний, имеющих место за один оборот детали, n — число оборотов детали в минуту, f — частота колебаний.

- 9. Построить топографическое строение поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме:
 - 9.1. Рассчитать положение точек траектории движения инструмента на развёртке обрабатываемой поверхности

$$\begin{cases} Z_i = Sn(t + \frac{60}{n}(N_i - 1)) + A\sin(2\pi f(t + \frac{60}{n}(N_i - 1))\sin\beta \\ X_i = \pi Dnt + A\sin(2\pi ft)\cos\beta \end{cases}$$
 где N_i — номер оборота детали, t — время

- 9.2. Построить топографическое строение поверхности после УЗПД по тангенциальной схеме наложив ширину следа на траекторию движения инструмента.
- 10. Проверить выполнение условия $Sm_{\text{расч}} \ge Sm_{\text{зад}}$. При его невыполнении скорректировать параметры обработки и повторить расчёты по пунктам 3-10.
- 11.Внесение технологических режимов УЗПД по тангенциальной схеме в технологическую документацию.

Общие рекомендации представлены в виде схемы на рисунке 5.15.



Рисунок 5.15 – Алгоритм назначения режимов УЗПД по тангенциальной схеме

Для материала Д16Т, в результате исследований, приведённых в главе 4 данной работы, были получены регрессионные зависимости для определения Ra (4.1) и Sm (4.3), которые могут быть использованы вместо выполнения алгоритма назначения режимов УЗПД по тангенциальной схеме при обработке инструментом с радиусом рабочей поверхности $r_1 = 4$ мм, на частоте УЗК f = 20 кГц и амплитуде A = 12 мкм, для подбора технологических параметров, обеспечивающих достижение требуемого состояния поверхности.

5.6 Реализация УЗПД по тангенциальной схеме

Применение технологии УЗПД по тангенциальной схеме было использовано для обеспечения минимального отклонения формы и малых значений шероховатости при производстве волноводов и корпусов теплонагруженных СВЧ усилителей мощности. На рисунке 5.16 представлены поверхности волновода до и после УЗПД, из которых видно, что применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования привело к улучшению микрогеометрического состояния поверхности.



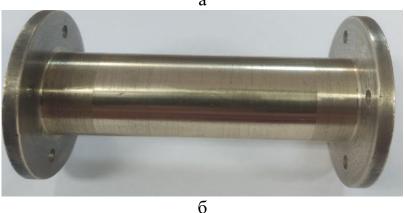


Рисунок 5.16 — Поверхность волноводов до и после УЗПД по тангенциальной схеме

Установлено, что применение УЗПД позволило снизить шероховатость поверхности волноводов с Ra=1,79 мкм до 0,25 мкм без ухудшения точности профиля обрабатываемой поверхности.

Применение УЗПД на корпусах теплонагруженных СВЧ усилителей мощности позволило уменьшить высотные параметры шероховатости поверхности, без искажения формы обрабатываемых поверхностей (рисунок 5.17). Применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования привело к уменьшению внутренних тепловых потерь, за счёт регуляризации микрорельефа.





Рисунок 5.17 – Корпуса теплонагруженных СВЧ усилителей мощности

Апробация результатов исследования проводилась на "Поршне со штоком 476.01.5585.053.000" "Шток И детали хромовым покрытием 14800.4203.102.000" выпускаемых АО "Авиаагрегат". Данные изделия выполнены из титанового сплава ВТЗ-1, одна из них имеет хромовое производства мелкосерийное. В качестве покрытие, ТИП оценки исследовалось микрогеометрическое состояние поверхности образцов. В результате применения УЗПД по тангенциальной схеме получилось добиться снижения параметров шероховатости у исследуемых материалов (рисунок 5.18). Также сделан вывод о возможности применения данного метода обработки с целью получения стабильного качества поверхности, что невозможно при применении АВ.



Рисунок 5.18 – Поверхность штока с покрытием нитрида-титана после УЗПД по тангенциальной схеме (исходное состояние по бокам)

Из рисунка видно, что обработка поверхности сплава BT3-1 с покрытием из нитрида титана методом УЗПД по тангенциальной схеме приводит к улучшению микрогеометрического состояния поверхности и увеличением отражательной способности поверхности.

Сравнение результатов использования УЗПД по тангенциальной схеме с AB приведено на рисунке 5.19.

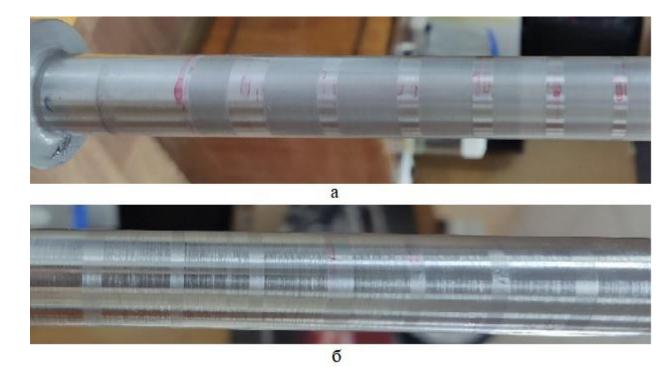


Рисунок 5.19 — Поверхность штока из ВТ3-1: а — УЗПД по тангенциальной схеме, б — АВ

Ha фотографиях заметны различия состояния поверхности используемых методов обработки. Пояски после УЗПД (см. рис 5.19 а) характеризуются однородностью и матовостью поверхности. Применение АВ приводит к формированию поверхности с лучшими отражательными свойствами, но не обладает однородностью (см. рис 5.19 б). В этом случае рельеф характеризуется наличием рисок, ведущих ухудшению К микрогеометрического состояния поверхности.

Выводы по 5 главе

- 1. Разработан алгоритм назначения режимов ультразвукового поверхностного пластического деформирования по тангенциальной схеме для обеспечения комплекса характеристик качества поверхностного слоя, базирующийся на согласованном применении модели формирования топографии поверхности с уравнениями, определяющими граничные условия по образованию волнистости и максимальному приросту микротвёрдости поверхности, и позволяющий разрабатывать технологические рекомендации по обработке пластичных металлов и сплавов данным методом.
- 2. Экспериментально показано, что применение УЗПД по тангенциальной схеме позволяет формировать в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения величина и уровень залегания которых зависит от режимов обработки (на образцах из Д16Т: $\sigma_{\tau} = -75 \dots -360 \text{ M}\Pi a$; $h_{\pi} = 55 \dots 160 \text{ мкм}$).
- 3. На основании дюрометрических испытаний установлено, что применение УЗПД позволяет повысить микротвёрдость деталей (от 40 до 60 %), выполненных из пластичных металлов и сплавов.
- 4. Экспериментально показано, что использование УЗПД по тангенциальной схеме позволяет формировать поверхностный слой с хорошей структурной приспосабливаемостью к условиям трения и повышенной износостойкостью, по сравнению с АВ (на 45%) и шлифованием (на 60%).
- 5. На основании циклических испытаний установлено, что применение УЗПД по тангенциальной схеме приводит к увеличению количества циклов нагружения и прилагаемой нагрузки приводящих к появлению остаточной пластической деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 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 β 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_{CT} , S, β) при частоте f = 20 к Γ ц 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, исключающие обрабатываемого материала интенсивное течение формирование волнистости поверхности, с учётом уровня исходной твёрдости материала детали.
- 4. Экспериментально установлены взаимосвязи параметров физикомеханического состояния материала поверхностного слоя (микротвёрдость поверхности, остаточные напряжения) с технологическими параметрами УЗПД (V_V , P_{CT} , S, β) при частоте f = 20 к Γ ц 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 % (для Д16, Д16Т, 10895, Л68), с формированием в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений в диапазоне -75 до -360 МПа (для Д16Т).

- 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 % (Л68) 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 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 образцов в 5 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 β , исходные значения параметров геометрии и материала обрабатываемой детали (Ra, Rz, Rmax, Rp, HB, E, μ , D), позволяющие определять значения технологических режимов обработки, обеспечивающих достижение требуемого состояния обработанных поверхностей деталей.
- 8. Результаты диссертационной работы использованы на промышленных предприятиях ДЛЯ обеспечения стабильного микрогеометрического теплонагруженных СВЧ состояния корпусов усилителей мощности (АО "НПО НИИИП-НЗиК"), титановых штоков (АО "Авиаагрегат", Γ. 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 прогнозировать 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, при обработке деталей различной формы из разнообразных конструкционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. H. Herz, Gesammelte Werke, Leipzig Barth., Bd 1. 1895
- 2. Iskhakova, G. A. Structure and mechanical properties of wc-co alloy surface layer after diamond-ultrasonical treatment / G. A. Iskhakova, V. P. Gileta, K. M. Rakhimyanov // Сверхтвердые материалы. 1991. № 5. С. 54—61.
- 3. Rakhimyanov, K., Kinematics of ultrasonic processing / K.Rakhimyanov, V.Gileta, A. Samul // ICMTMTE 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 022054 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/971/2/022054
- 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.) Mode of access: https://www.matec-
- conferences.org/articles/matecconf/abs/2019/46/contents/contents.html. Title from screen DOI: 10.1051/matecconf/201929705005.
- 5. Алёхин, В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоёв материалов // М.: Наука, 1983. 280 с.
- 6. Артемьев, В. В. Ультразвуковые виброударные процессы / В.В. Артемьев, В. В. Клубович, В. Н. Сакевич // Мн. : БНТУ, 2004. 258 с.
- 7. Артемьев, В. В. Ультразвук и обработка материалов / В.В. Артемьев, В.В. Клубович, В. В. Рубаник. // Мн.: Экоперспектива. 2003. 335 с.
- 8. Асанов, В. Б. Качество поверхностного слоя деталей машин и его особенности после упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом. Автореферат диссертации на соискание учебной степени кандидата технических наук. Новосибирск: НЭТИ, 1972.
- 9. Аскинази, Б. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Машиностроение, 1989. 200 с.: ил.

- 10. Балтер, М. А. Упрочнение деталей машин. // М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
- 11. Безнедельный, А. И. Влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя закаленных сталей при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом / А. И. Безнедельный, В. Б. Асанов, В. П. Гилета // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 4(57). С. 19-22.
- 12. Боровин, Ю. М. Повышение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при финишной ультразвуковой обработке: специальность 05.03.01: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Боровин Юрий Михайлович. Москва, 2005. 140 с.
- 13. Борозна, В. Ю. Повышение физико-механических свойств титановых сплавов путем модифицирования поверхности и формирования композитного металл-полимерного слоя ультразвуковой обработкой : специальность 05.16.09 "Материаловедение (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Борозна Вячеслав Юрьевич. Томск, 2011. 134 с.
- 14. Ботвина, Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности / Л. Р. Ботвина. Москва : Наука, 2008.
- 15. Брондз, Л. Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. М.: Машиностроение, 1986. –184 с., ил.
- 16. Букатый, С. А. Автоматизированная система определения остаточных напряжений в образцах сложной формы / С. А. Букатый, А. С. Букатый // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2006. № 2-2(10). С. 307-310.
- 17. Вашуль X. Практическая металлография. Методы изготовления образцов // М.: Металлургия, 1988 320 с.

- 18. Витвинов, М. К. Технологическое наследование волнистости на операциях механической обработки на примере фрезерования и плоского шлифования: специальность 05.02.07: диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук / Витвинов Максим Константинович. Барнаул, 2015. 118 с.
- 19. Витенберг, Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы её измерения // М.: Судостроение, 1971. 96 с.
- 20. Вуколов Э.А. Регрессионный анализ. Методические указания по курсу «Статистика». М.: МИЭТ, 2000. 52 с.: ил.
- 21. Гилета, В. П. Напряженное состояние упрочненного слоя после алмазной ультразвуковой обработки / В. П. Гилета, Г.А. Исхакова // Сверхтвердые материалы. 1990. № 3. С.52-56.
- 22. Гилета, В. П. Формирование качества поверхностного слоя при ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработке в диапазоне частот колебаний 18...66 кГц и разработка комплекса решений по расширению технологических возможностей этого метода. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Курган: КМИ, 1989.
- 23. Головань, А. Я., Грановский Э.Г., Машков В.Н. Алмазное точение и выглаживание / А.Я. Головань, Э.Г. Грановский, В.Н. Машков // М.: Машиностроение, 1976. 32 с. с ил.
- 24. ГОСТ 18296-72 Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения
- 25. ГОСТ 23.204-78 Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении = Products wear resistance assurance. A method of assessment of the surface wearing ability in friction : межгос. стандарт : утв. постановлением Гос.ком. СССР по стандартам от 11 декабря 1978 г. № 3283: введен 1980.01.01. М.: Стандартинформ, 2005. 2 с. Текст: непосредственный

- 26. ГОСТ 25347— 2013 (*ISO* 286-2:2010) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов
- 27. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость
- 28. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
- 29. ГОСТ 30480-97 Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования = Products wear resistance assurance. Methods of wear resistance tests. General requirements: межгос. стандарт: офиц. изд.: введен 1998.07.01. Москва: Изд-во стандартов, 1998. 8 с. Текст: непосредственный
- 30. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников = Measurements microhardness by diamond instruments indentation : гос. стандарт СССР : утв. постановлением Госком. стандартов Совета Министров СССР от 09.01.76 г. № 68 : введен 1977.01.01 : переизд. март 1993 г. Москва : Изд-во стандартов, 1993. 25 с. Текст: непосредственны
- 31. ГОСТР ИСО 4287-2014 ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИИ (GPS). Текстура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры текстуры поверхности
- 32. Гринченко, И. Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов // М.: Машиностроение, 1971. 120 с.
- 33. Давиденков, Н. Н. Избранные труды. Т. 2. Механические свойства материалов и методы измерения деформаций // Киев: Наукова думка, 1981. 644 с.

- 34. Дальский, А. М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. / А.М. Дальский, Б.М. Базаров, А.С. Васильев, А.М. Дмитриев // М.: Изд-во МАИ, 2000, 360 с.
- 35. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов // М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
- 36. Демкин, Н. Б. Фактическая площадь касания твёрдых тел // М., Издво АН СССР, 1962
- 37. Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее. Коррозионное растрескивание металлов: Пер. с англ. 1985. – 488 с.
- 38. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ: в 2-х ч. / Дрейпер Н., Смит Г. // Москва: Финансы и статистика, 1986, 720 с.
- 39. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин // Москва: Научнотехническое издательство "Машиностроение", 1986. 224 с.
- 40. Дьяченко П. Е. Влияние шероховатости поверхности на её износ // Качество поверхности деталей машин // М. Л.: Машгиз, 1949. С. 20-31.
- 41. Ежелев, А. В. Анализ способов обработки поверхностнопластическим деформированием / А.В. Ежелев, И.Н. Бобровский, А.А. Лукьянов // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 6-3. — С. 642-646
- 42. Елизаветин, М. А. Повышение надежности машин Текст. / М. А. Елизаветин // М.: Машиностроение, 1973. 431 с.
- 43. Жарский, М. И. Коррозия и защита металлических конструкций и оборудования: учеб. goсoбие / М.И. Жарский [и др] // Минск: Выш. шк., 2012. 303 с., [16] л. цв. вкл.: ил.
- 44. Зайдес, С. А. Влияние кинематики процессов поверхностного пластического деформирования на качество упрочненного слоя / С. А. Зайдес, К. К. Нго // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 5(149). С. 235-240.

- 45. Зайдес, С. А. Влияние остаточных напряжений на износостойкость упрочненных валов / С. А. Зайдес, Л. Г. Климова, С. А. Пронькина // Динамика систем, механизмов и машин. -2004. -№ 2. С. 134-136.
- 46. Зайдес, С. А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 129-139.
- 47. Зайдес, С. А. Современное состояние отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 10. С. 28–34. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-28-34.
- 48. Зайдес, С. А. Справочник по процессам поверхностного пластического деформировани / под ред. С.А. Зайдеса // Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. 504 с.
- 49. Захарченко, К. В. О влиянии керамического покрытия на деформационные характеристики алюминиевого сплава Д16АТ / К. В. Захарченко, В. И. Капустин, А. Ю. Ларичкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 3(64). С. 37-44.
- 50. Исхакова, Г. А. Структура и механические свойства поверхностного слоя сплавов WC-Co после алмазной ультразвуковой обработки / Г. А. Исхакова, В. П. Гилета, Х. М. Рахимянов // Сверхтвердые материалы. 1991. N_2 5. С. 54—61.
- 51. Каледин, Б. А., Чепа П.А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием // Минск: Изд-во Наука и техника, 1974. 230 с.
- 52. Комбалов, В. С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей // М., «Наука», 1983, 136 с.
- 53. Костецкий, Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении/Под ред. Б.И.Костецкого // Киев: Техника, 1976. 291 с.

- 54. Крагельский, И. В. В сб.: Трение и износ в машинах // М., Изд-во АН СССР, 1950
- 55. Кудрявцев, В. Н. Расчет и проектирование зубчатых редукторов / В.Н. Кудрявцев, И.С. Кузьмин, А.Л. Филипенков // СПб.: Политехника, 1993. 448 с.
- 56. Кудрявцев, И. В. Исследования по упрочнению деталей машин/Под ред. И.В Кудрявцева // М.: Машиностроение, 1972. 328 с.: ил.
- 57. Кудрявцев, И. В. Основы выбора режима упрочняющего поверхностного наклепа ударным способом (методом чеканки) // В кн.: Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа. ЦНИИТМаш. М.: Машиностроение, 1965. книга 108. С.6-34.
- 58. Кудрявцев И. В. Усталость крупных деталей машин / И. В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченков, Н.М. Савина. // М.: Машиностроение, 1981. 238 с.
- 59. Лоповок, Т. С. Волнистость поверхности и её измерение // М.: Издво стандартов, 1973. 184 с.
- 60. Лошманов, А. М., Рыбакова П.М. Остаточные напряжения и их влияние на износостойкость деталей машин // Вестник машиностроения, 1985. С. 8-12.
- 61. Марков, А. И. Применение ультразвука в промышленности // М.: Машиностроение, 1975. 240 с.
- 62. Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков // Москва: Машиностроение, 1980. 237 с.
- 63. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твёрдости/ М.П. Марковец // Москва: Машиностроение, 1979. 191 с.
- 64. Маталин, А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин // Киев: Техника, 1971. 144 с.

- 65. Матлин, М. М. Дробеударное упрочнение деталей машин / М.М. Матлин, В.О. Мосейко, В.В. Мосейко, С.Л. Лебский // М.: Машиностроение, 2008. 230 с.
- 66. Минаков, А. П. Волнистость и оценка ее влияния на эксплуатационные свойства деталей машин / А. П. Минаков, М. Е. Лустенков, И. Д. Камчицкая, П. В. Афанасьев // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. № 3(68). С. 65-75.
 - 67. Михин, Н. М. Внешнее трение твёрдых тел // М «Наука», 1977
- 68. Муханов, И. И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом // М: Машиностроение, 1978. 44 с.
- 69. Муханов, И. И. Ультразвуковая упрочняюще-чистовая обработка металлов деформаторами из синтетических алмазов / И. И. Муханов, Х. М. Рахимянов, В. И. Синдеев // Опыт применения ультразвуковой техники и технологии: Всесоюз. науч.-техн. совещ. (Саратов, 22–24 мая 1985 г.): тез. докл. М., 1985. Ч. 2 С. 123–127.
- 70. Муханов, И. И. Характеристики пластической деформации при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом (УЗО) / И. И. Муханов, Х. М. Рахимянов, В. И. Синдеев // Опыт применения ультразвуковой техники и технологии: Всесоюз. науч.-техн. совещ. (Саратов, 22–24 мая 1985 г.): тез. докл. М., 1985. Ч. 1. С. 123–126.
- 71. Мухин, В. С. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД Текст // Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД: научная школа УГАТУ. Уфа, 2002. С. 38-69. ISBN 5-86911-365-2.
- 72. Неверов А. С. Коррозия и защита материалов / А.С. Неверов, Д.А. Родченко, М.И. Цырлин, 2013.
- 73. Никитин, Ю. В. Формирование поверхностного слоя на деталях из серого чугуна обработкой на основе ультразвукового пластического

- деформирования и плазменного нагрева: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю. В. Никитин. Новосибирск, 2002. 259 с.
- 74. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник // М: Машиностроение, 1987, 328 с., ил.
- 75. Одинцов, Л. Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием. // М. Машиностроение, 1981. 160 с.
- 76. Осипенкова, Г.А. Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний / Г.А. Осипенкова, В.Ф. Пегашкин // М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). 2-е изд., перераб. и доп Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2015. 179 с.
- 77. Павлов, В. Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичев, В. Б. Иванов. Самара: Сам. науч. центр РАН, 2008.
- 78. Панасюк, В. В. Механика разрушения и прочность материалов : справ. пособие: 4 т. / под общей ред. В. В. Панасюка // Киев : Наукова думка, 1988–1990. Т. 4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романив О. Н., Ярема С. Я., Никифорчин Г. Н [и др.]. 680 с.
- 79. Панин, В. Е. Мезомеханика поверхностно упрочнённых материалов / В.Е. Панин, А.И. Слосман, Н.А. Антипина // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т.306. №1 С. 30 36.
- 80. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием // М.: Машиностроение, 1978. 152 с. ил.
- 81. Плешанова, Ю.А. Моделирование остаточных напряжений в деталях машин [Текст]: дис. ... канд. техн. Наук: 05.02.02 / Ю. А. Плешанова. Санкт-Петербург, 2016. 144 с.

- 82. Подзей, А.В. Технологические остаточные напряжения / Под. ред. А.В. Подзея // М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
- 83. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В. Л. Попов. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с. ISBN 978-5-9221-1443-1.
- 84. Попова, В. В. Поверхностное пластическое деформирование и физико- химическая обработка: Учебное пособие по дисциплине «Процессы и операции формообразования» для студентов всех форм обучения направления подготовки 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / Рубцовский индустриальный институт. Рубцовск, 2013. 98 с.
- 85. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 30.07.2020 № 273 "Об утверждении Федеральных авиационных правил "Правила допуска к эксплуатации пилотируемых гражданских воздушных судов на основании акта оценки воздушного судна на его соответствие требованиям к летной годности и к охране окружающей среды".
- 86. Прилуцкий, В. А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей // М.: Машиностроение, 1978. 136 с., ил.
- 87. Проскуряков, Ю. Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов // М.: Машиностроение, 1971. 208 с.
- 88. Проскуряков, Ю. Г. Упрочняюще-калибрующие методы обработки: Справочное пособие // М.: Машиностроение, 1965. 207 с.
- 89. Рахимянов, К. Х. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка ультразвуковым инструментом (УЗО) беговых дорожек колец подшипников / Х. М. Рахимянов, В. Б. Асанов, В. П. Гилета [и др.] // Опыт промышленного применения ультразвуковой техники и технологии: тез. докл. Всесоюз. науч.техн. семинара (Новосибирск, 7–9 окт. 1976 г.) М., 1976. С. 129–132.
- 90. Рахимянов, Х. М. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом

- деформировании / Х. М. Рахимянов, Ю. С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. -2010. -№ 2(62). -С. 3-10.
- 91. Рахимянов, X. М. Прогнозирование состояния поверхностного слоя при комбинированном поверхностном упрочнении деталей машин / X. М. Рахимянов, Ю. В. Никитин // Упрочняющие технологии и покрытия. − 2010. − № 10(70). − С. 43-48.
- 92. Рыжов, О. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / О.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров // М.: Машиностроение, 1979. 176 с., ил. (Б-ка технолога).
- 93. Рыжов, Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин // Киев: Наука думка, 1984. 271 с.
- 94. Самуль, А.Г. Выбор рациональной схемы ультразвуковой обработки для конструкционных материалов средней твердости / А. Г. Самуль, Х. М. Рахимянов, 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.
- 95. 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
- 96. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография // М: Металлургия, $1967, -400 \mathrm{\ c}$
- 97. Семенова, Ю. С. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей ультразвуковым пластическим деформированием: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Семенова Юлия Станиславовна. Барнаул, 2012. 194 с.
- 98. Степанова, Т. Ю., Технологии поверхностного упрочнения деталей машин // Иван. гос. хим.-технол. ун-т.-Иваново, 2009. 64 с.

- 99. Степчева, З. В. Повышение эффективности алмазного выглаживания на основе рационального использования энергии модулированного ультразвукового поля: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Степчева Зоя Валерьевна. Ульяновск, 2007. 232 с.
- 100. Сулима, А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев // М.: Машиностроение, 1974, 256 с.
- 101. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. П. Ягодкин. // М.: Машиностроение, 1988.-238 с.-ISBN 5-2170-0060-0.
- 102. Суслов А. Г. Справочник технолога / под общей ред. А.Г. Суслова. // М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
- 103. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко // М.: Машиностроение. 2006. 448 с.
- 104. Табенкин, А. Н. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. Санкт-Петербург: Федеральное государство автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2018. 265 с.
- 105. Таурит Г. Э., Обработка крупногабаритных деталей / Г.Э. Таурит, Е.С. Пуховский, Е.Ю. Грищенко // К.: Техніка, 1981. 208 с., ил. Библиогр.: с. 205–206.
- 106. Торбило, В. М., Алмазное выглаживание. // М., Машиностроение, 1972, 105 с.
- 107. Федосова, Н. Л. Антикоррозионная защита металлов / Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, К.Е. Румянцева, А.В. Балмасов, М.Д. Чекунова // Иваново. 2009 187 с.

- 108. Филиппов, М. А. Упрочнение и защита поверхности металлов / М.А. Филиппов, И.И. Косицина, М.А. Гервасьев // Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 324 с.
- 109. Харченко, В. В. Повышение качества поверхностного слоя изделий из титанового сплава методом ультразвуковой обработки: специальность 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Харченко Владислав Викторович. Москва, 2012. 250 с.
- 110. Хворостухин, Л. А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалёв // М.: Машиностроение, 1988. 144 с.
- 111. Шнейдер, Ю. Г. Инструмент для чистовой обработки металлов давлением // Л.: Машиностроение, 1970 г. 248 стр. Табл. 29. Илл. 126. Библ. 44 назв.
- 112. Шнейдер, Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. 264 с.
- 113. Ярославцева, О. В. Коррозия и защита металлов: / О. В. Ярославцева, Т. Н. Останина, В. М. Рудой, И. Б. Мурашова // М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 90 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

П.1. Статистическая обработка результатов исследования

С целью подтверждения достоверности полученных результатов и их допустимых границ проводилась статистическая обработка результатов прямых многократных равноточных измерений. Обработка проводилась с использованием теории математической по следующему алгоритму:

- 1) Исключение систематической погрешности;
- 2) Вычисление среднего арифметического значения \bar{x} по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

где x_i – результат i-го измерения; n – число измерений

3) Вычисление среднего квадратического отклонения $\sigma_{\bar{x}}$ от значения погрешности измерений

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

4) Исключение промахов по критерию Граббса ($n \le 40$)

$$G_p = \frac{x_p - \bar{x}}{S}$$

где
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Для проверки результата измерения вычисляются значения критериев G_1 и G_2 максимального x_{max} и минимального x_{min} значения выборки, исходя из предположения, что эти результаты могут содержать грубую погрешность.

$$G_1 = \left| \frac{x_{max} - \bar{x}}{S} \right|$$

$$G_2 = \left| \frac{x_{min} - \bar{x}}{S} \right|$$

Путём сравнения G_1 и G_2 с теоретическим значением Граббса G_T сделать вывод о вхождении исследуемого значения в диапазон измерений или его исключении.

- 5) Определение коэффициента Стьюдента при заданном значении доверительной вероятности P и числе измерений n
- 6) Нахождение границ доверительного интервала для случайной погрешности

$$\bar{\Delta} = \pm t_p \sigma_{\bar{x}}$$

Приведём расчёт статистической обработки результатов определения параметра Ra для поверхности образцов из Д16Т после обработки на режимах $V_V = 70,68$ м/мин, S = 0,1 мм/об, $P_{\rm CT} = 20$ H, $\beta = 0$ ° (табл. П1).

Таблица $\Pi.1$ – Значения Ra образцов после УЗПД, мкм

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,15	0,17	0,18	0,2	0,18	0,17	0,15	0,16	0,18	0,17

Вычисление среднего арифметического значения \bar{x} :

$$ar{x} = rac{(0,15+0,17+0,18+0,2+0,18+0,17+0,15+0,16+0,18+0,17)}{10} = 0,17$$
 мкм

Вычисление среднего квадратического отклонения $\sigma_{\bar{x}}$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{(0,15-0,17)^2 + (0,17-0,17)^2 + \dots + (0,18-0,17)^2 + (0,17-0,17)^2}{10(10-1)}} = 0,0048 \text{ MKM}$$

Исключение промахов по критерию Граббса

$$G_1 = \left| \frac{0.2 - 0.17}{0.015} \right| = 1.9$$

$$G_2 = \left| \frac{0.15 - 0.17}{0.015} \right| = 1.37$$

Теоретическое значение Граббса для $n=10,\ q=1,\ G_T=2,482.$ Так как $G_1 < G_T$ и $G_2 < G_T$, то результаты корректны и не исключаются.

Нахождение границ доверительного интервала (для доверительной вероятности P=0.99 значение коэффициента Стьюдента $t_p=3.25$).

$$\bar{\Delta}$$
= $\pm 3,25 \cdot 0,0048 = \pm 0,015$ мкм

Аналогичная статистическая обработка данных приводилась для остальных измеряемых величин.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б П.2. Обработка результатов исследования микрогеометрических параметров поверхности

П.2.1. Параметры шероховатости и отклонения формы образцов из алюминиевого сплава Д16Т

Технология	V_V ,	S,	$P_{\rm CT}$,	β ,	Ra,	Rz,	Rmax,	S,	Sm,	t_P ,	R_{sk}	$\overline{V_o}$,	R_P ,	r_{B} ,	$r_{ m B\Pi,}$	0,
	м/мин	мм/об	Н	0	МКМ	МКМ	МКМ	МКМ	МКМ	%		MM^3/MM^2	МКМ	МКМ	MKM	МКМ
Исходная					0,71	3,89	4,37	51,7	97,5	61,8	0,47	5,6	2,58	31	140	0,71
УЗПД	70,68	0,1	20	0	0,17	1,07	1,28	30,5	61	100	-0,82	1,78	0,43	178	60	0,76
УЗПД	70,68	0,1	40	0	0,13	0,94	1,15	34,9	69,8	100	-0,59	1,51	0,38	194	147	0,46
УЗПД	70,68	0,1	50	0	0,12	0,88	1,01	45,4	84,8	99,7	0,27	2,7	0,35	302	242	0,40
УЗПД	70,68	0,1	60	0	0,13	0,93	1,09	33,0	79,6	100	-0,33	1,32	0,35	312	160	0,43
УЗПД	70,68	0,1	80	0	0,13	0,93	1,12	36,6	73,2	99,9	-0,39	1,86	0,39	185	185	0,45
УЗПД	70,68	0,1	100	0	0,16	1,21	1,57	41,4	69,8	99,9	-0,07	1,99	0,53	96	204	0,38
УЗПД	70,68	0,1	120	0	0,22	1,43	1,7	51,7	71,3	93,8	0,47	5,6	0,67	101	107	0,55
УЗПД	70,68	0,07	20	0	0,13	1,11	1,56	30,1	60,1	100	-1,21	2,27	0,37	154	103	0,67
УЗПД	70,68	0,07	40	0	0,09	0,71	0,95	31,2	62,4	100	-0,38	0,87	0,28	164	233	0,51
УЗПД	70,68	0,07	60	0	0,1	0,69	0,97	52,4	84,3	100	-0,36	0,91	0,28	405	256	0,5
УЗПД	70,68	0,07	80	0	0,12	0,93	1,25	34,2	72,7	100	-0,41	1,19	0,37	182	217	0,49
УЗПД	70,68	0,07	100	0	0,16	1,17	1,55	37,7	69,7	100	-0,53	1,95	0,46	165	115	0,51
УЗПД	70,68	0,07	120	0	0,16	1,18	1,58	33,7	67,5	100	-0,51	1,82	0,45	157	106	0,65
УЗПД	70,68	0,13	20	0	0,32	2	2,66	47,9	64,7	100	-0,16	8,73	0,72	172	27	0,47
УЗПД	70,68	0,13	40	0	0,2	1,09	1,37	55,2	74,5	100	-0,12	1,13	0,48	278	66	1,49
УЗПД	70,68	0,13	60	0	0,2	1,06	1,29	75,4	91,1	100	-0,05	1	0,49	396	102	1,16
УЗПД	70,68	0,13	80	0	0,21	1,11	1,31	46,6	77,6	99,9	0,07	1,28	0,53	247	76	0,79
УЗПД	70,68	0,13	100	0	0,21	1,22	1,61	48,3	71,8	100	0,52	0,85	0,58	149	84	1,05
УЗПД	70,68	0,13	120	0	0,24	1,56	1,91	39,8	71,6	99,6	-0,05	1,3	0,85	55	194	0,95
УЗПД	70,68	0,1	50	15	1,11	4,33	4,63	84,0	84,8	46,4	0,22	1,05	2,09	172	10	0,89

Окончание табл. П.2.1

УЗПД	70,68	0,1	50	30	1,61	6,51	6,87	81,5	84,5	53	-0,36	35,99	2,94	134	6	1,29
УЗПД	70,68	0,1	50	45	1,74	6,69	7,16	50,7	83,8	46,6	-0,1	19,61	3,35	98	6	1,39
УЗПД	70,68	0,1	50	60	0,3	1,65	1,93	83,3	123,2	100	0,21	1,44	0,93	206	252	0,4
УЗПД	70,68	0,1	50	90	0,25	1,9	2,91	77,8	145,2	99,5	-0,97	3,65	0,60	892	195	0,38
AB	70,68	0,1	20	0	0,29	1,75	2,57	53,1	54,2	88,5	-0,91	9,74	0,67	124	22	0,69
AB	70,68	0,1	40	0	0,16	1,14	1,52	48,1	61,3	98,8	-0,83	2,62	0,42	167	71	0,7
AB	70,68	0,1	50	0	0,15	1,05	1,38	49,5	75,5	98,9	-0,75	1,94	0,44	184	159	8,9
AB	70,68	0,1	60	0	0,13	0,91	1,19	36,0	72	99,9	-0,4	1,12	0,36	238	139	1,26
AB	70,68	0,1	80	0	0,2	1,34	1,61	33,2	66,5	97,8	-0,37	2,02	0,57	124	81	1,13
AB	70,68	0,1	100	0	0,19	1,25	1,49	30,5	61,1	99,1	-0,1	1,72	0,57	91	86	0,53
AB	70,68	0,1	120	0	0,24	1,53	1,81	33,4	66,7	92,5	0,16	1,83	0,76	68	103	1,06

П.2.2. Параметры шероховатости образцов из алюминиевого сплава Д16

Технология	V_V ,	S,	$P_{\rm CT}$,	β , $^{\circ}$	Ra,	Rz,	Rmax,	S,	Sm,	<i>t</i> _P , %	R_{sk}	V_o ,	R_P ,	r_{B} ,	$r_{ m B\Pi,}$
	м/мин	мм/об	Н		MKM	MKM	MKM	MKM	MKM			MM^3/MM^2	MKM	MKM	MKM
Исходная					0,85	5,66	8,01	65,9	71,5	56,3	0,67	6,45	2,86	18	45
УЗПД	62,83	0,1	20	0	0,23	1,94	2,79	66,2	131,6	99,1	-0,5	2,95	0,79	207	613
УЗПД	62,83	0,1	40	0	0,25	1,67	2,16	51,5	97,8	100	0,03	1,68	0,76	164	181
УЗПД	62,83	0,1	60	0	0,27	1,83	2,25	46	79,9	100	0,16	1,92	0,82	102	112
УЗПД	62,83	0,1	80	0	0,32	1,96	2,35	58,4	80	99,8	0,38	1,44	0,97	87	93
УЗПД	62,83	0,1	100	0	0,39	2,55	2,92	60,3	82,3	97,7	0,45	1,2	1,35	47	143
УЗПД	62,83	0,1	120	0	0,65	3,07	3,53	72,8	83	74,0	0,52	0,99	1,71	77	32
УЗПД	62,83	0,1	20	0	0,23	1,94	2,79	66,2	131,6	99,1	-0,5	2,95	0,79	207	613
УЗПД	62,83	0,1	20	15	0,43	2,65	3,08	61,6	91,9	98,2	-0,1	3,1	1,18	122	66
УЗПД	62,83	0,1	20	30	0,47	2,77	3,55	69,2	83,9	92,5	-0,4	8,52	1,25	106	45

Окончание табл. П.2.2

УЗПД	62,83	0,1	20	45	0,67	3,45	3,87	70	98,2	97,9	-0,1	3,22	1,87	85	51
УЗПД	62,83	0,1	20	60	0,25	1,92	2,34	79,4	102,4	100	0,37	1,22	0,72	221	163
УЗПД	62,83	0,1	20	90	0,24	2,01	2,49	75,5	113,2	95,5	0,58	1,95	0,71	259	223
AB	62,83	0,1	20	ı	0,19	1,9	2,83	71,8	83,5	95,9	-2,7	5,87	0,68	148	600
AB	62,83	0,1	40	-	0,1	0,91	1,25	53,1	79,7	99,9	-0,8	1,23	0,34	176	511
AB	62,83	0,1	60	-	0,11	0,91	1,27	44,4	66,7	99,9	-0,5	0,96	0,34	162	206
AB	62,83	0,1	80	ı	0,13	1,04	1,46	41	61,5	99,8	-0,4	0,88	0,35	199	91
AB	62,83	0,1	100	ı	0,23	1,53	2,19	49,2	73,8	96,4	-0,2	1,53	0,83	55	254
AB	62,83	0,1	120	ı	0,25	2,41	2,97	33,3	66,4	93,5	-1,2	4,63	0,95	36	246

П.2.3. Параметры шероховатости образцов из стали 10895

Технология	V_V ,	S,	$P_{\rm CT}$,	β , $^{\circ}$	Ra,	Rz,	Rmax,	S,	Sm,	t_P ,	R_{sk}	V_o ,	R_P ,	r_{B} ,	$r_{ m B\Pi,}$
	м/мин	мм/об	Н		MKM	MKM	MKM	МКМ	MKM	%		MM^3/MM^2	MKM	МКМ	МКМ
Исходная					0,64	4,96	5,92	53,2	80,6	74,1	-1,12	21,34	2,84	12	537
УЗПД	62,83	0,1	20	0	0,26	2,28	2,95	84,5	84,5	99,7	-1,75	12,18	0,75	145	106
УЗПД	62,83	0,1	40	0	0,19	1,45	1,94	59,5	78,45	99,8	-0,81	4,76	0,54	180	120
УЗПД	62,83	0,1	60	0	0,31	2,09	2,53	51,3	82,3	100	-0,56	6,44	0,79	183	59
УЗПД	62,83	0,1	80	0	0,28	1,91	2,73	69,1	96,2	99,9	-0,91	6,18	0,67	343	78
УЗПД	62,83	0,1	100	0	0,18	1,4	1,93	45,2	92,5	99,9	-0,01	1,58	0,46	391	129
УЗПД	62,83	0,1	120	0	0,21	1,44	2,23	68	85,1	99,9	-0,04	2,08	0,50	354	81
УЗПД	62,83	0,1	140	0	0,55	3,12	4,97	54,5	74,5	98,7	-0,72	7,5	0,99	327	14
УЗПД	62,83	0,1	160	0	0,66	4,83	6,4	50,4	65,8	96,3	-0,93	14,98	1,15	237	9
УЗПД	62,83	0,1	100	15	0,19	1,34	1,87	49,8	82,6	99,9	-0,33	1,37	0,46	368	85
УЗПД	62,83	0,1	100	30	0,24	1,56	2,58	64,9	106,4	99,9	-1,12	1,8	0,62	378	131
УЗПД	62,83	0,1	100	45	0,32	2,14	3,58	65,7	129,8	99,7	-0,11	4,76	0,84	393	154

Окончание табл. П.2.3

УЗПД	62,83	0,1	100	60	0,17	1,79	2,89	69,8	139,7	99,7	0,07	5,22	0,53	447	601
УЗПД	62,83	0,1	100	90	0,16	1,45	2,48	78,5	157	99,9	-0,15	8,3	0,48	714	673
AB	62,83	0,1	20	ı	0,68	5,48	6,54	54,9	60,5	89,7	-2,19	33,62	1,35	114	9
AB	62,83	0,1	40	ı	0,6	4,76	5,73	53,4	67,5	91,4	-2,15	10,1	1,25	137	13
AB	62,83	0,1	60	1	0,51	3,75	4,97	49,8	69	89,3	-1,56	21,3	1,15	121	19
AB	62,83	0,1	80	ı	0,34	2,95	3,2	44,1	70,5	92,5	-2,15	10,16	0,82	148	35
AB	62,83	0,1	100	ı	0,4	4,96	5,92	53,2	78,5	88,6	-1,56	21,33	0,84	267	27
AB	62,83	0,1	120	ı	0,34	2,13	2,69	49	72,9	96,7	-0,23	3,11	0,74	232	30
AB	62,83	0,1	140	ı	1,39	6,61	8,09	70,8	81,7	63,5	-0,29	14,66	2,91	83	9
AB	62,83	0,1	160	ı	1,43	7,06	8,96	72,1	80,9	56,8	-0,02	7,01	3,22	60	9

П.2.4. Параметры шероховатости образцов из Л68

Технология	V_V ,	S,	$P_{\rm CT}$,	β , °	Ra,	Rz,	Rmax	S,	Sm,	t_P ,	R_{sk}	V_o ,	R_P ,	r _n	V or
	м/мин	MM/O	Н		МКМ	MKM	, MKM	МКМ	MKM	%		MM^3/MM^2	MKM	$r_{ m B},$ MKM	<i>r</i> _{ВП,} МКМ
		б											WIKWI	IVIIXIVI	WIKWI
Исходная					1,49	8,65	10,2	80,8	133,7	48,6	-0,11	17,45	4,97	37	83
УЗПД	62,83	0,1	20	0	0,18	1,77	2,59	84	168,1	97	-2,17	5,53	0,55	661	756
УЗПД	62,83	0,1	40	0	0,16	1,11	1,74	71,5	143,1	99,5	-0,95	3,09	0,51	473	710
УЗПД	62,83	0,1	60	0	0,19	1,25	1,57	60,9	121,9	98,1	-0,61	3,34	0,50	555	237
УЗПД	62,83	0,1	80	0	0,19	1,25	1,69	58,8	117,6	98,3	-0,38	2,21	0,54	398	273
УЗПД	62,83	0,1	100	0	0,2	1,3	1,68	57,9	115,9	98,4	-0,24	1,6	0,63	258	357
УЗПД	62,83	0,1	120	0	0,26	1,53	1,91	66,5	133,1	97,7	-0,36	4,01	0,69	487	205
УЗПД	62,83	0,1	140	0	0,21	1,29	1,58	60,9	121,8	97,9	-0,02	1,71	0,64	297	341
УЗПД	62,83	0,1	160	0	0,21	1,31	1,67	53,9	107,8	98,2	-0,32	2,1	0,50	567	131
AB	62,83	0,1	20	-	0,71	3,98	4,68	71,7	101,4	69,5	-1,44	38,62	1,20	602	18

Окончание табл. П.2.4

AB	62,83	0,1	40	ı	0,29	2,66	4,63	102	121,5	84,9	-0,75	8,3	1,05	118	540
AB	62,83	0,1	60	ı	0,25	1,94	3,1	86	101,5	79,8	0,81	2,62	0,68	259	137
AB	62,83	0,1	80	ı	0,21	1,76	2,45	59,5	87,4	99,3	0,12	2,79	0,62	179	151
AB	62,83	0,1	100	-	0,19	1,25	1,52	38	76	98,5	-0,11	2,85	0,49	242	85
AB	62,83	0,1	120	ı	0,17	1,11	1,3	40,1	80,3	99,6	-0,3	1,91	0,48	209	141
AB	62,83	0,1	140	ı	0,18	1,15	1,4	40	80	99,5	0,07	1,22	0,56	141	184
AB	62,83	0,1	160	ı	0,21	1,43	1,63	36,1	72,3	97,7	-0,12	2,03	0,46	372	48

ПРИЛОЖЕНИЕ В П.З. Обработка результатов исследования микротвёрдости поверхности

П.З.1. Микротвёрдость образцов из Д16Т

Технология	V_V ,	S,	<i>P</i> , H	β, °	HV,	ΔHV, %
ТСАНОЛОГИА	<i>∨ ∨,</i> м/мин	мм/об	1,11	ho,	иту, М∏а	$\Delta \Pi V$, 70
УЗПД	70,68	0,07	120	0	73	12,3
УЗПД	70,68	0,07	100	0	76	16,9
		·	80	0	79	
УЗПД	70,68	0,07				21,5
УЗПД	70,68	0,07	60	0	81	24,6
УЗПД	70,68	0,07	40	0	85	30,8
УЗПД	70,68	0,07	20	0	82	26,2
УЗПД	70,68	0,1	120	0	72	10,8
УЗПД	70,68	0,1	100	0	75	15,4
УЗПД	70,68	0,1	80	0	77	18,5
УЗПД	70,68	0,1	60	0	79	21,5
УЗПД	70,68	0,1	40	0	83	27,7
УЗПД	70,68	0,1	20	0	80	23,1
УЗПД	70,68	0,13	120	0	70	7,7
УЗПД	70,68	0,13	100	0	73	12,3
УЗПД	70,68	0,13	80	0	76	16,9
УЗПД	70,68	0,13	60	0	80	23,1
УЗПД	70,68	0,13	40	0	82	26,2
УЗПД	70,68	0,13	20	0	78	20,0
AB	70,68	0,1	120	0	64	-1,5
AB	70,68	0,1	100	0	68	4,6
AB	70,68	0,1	80	0	72	10,8
AB	70,68	0,1	60	0	75	15,4
AB	70,68	0,1	40	0	73	12,3
AB	70,68	0,1	20	0	72	10,8

 $\Pi.3.2$ Микротвёрдость образцов из Д16

Технология	V_V ,	S,	<i>P</i> , H	β, °	HV,	ΔHV, %
	м/мин	мм/об		, ,	МПа	ŕ
УЗПД	62,83	0,25	80	0	41	32,2
УЗПД	62,83	0,2	80	0	43	38,7
УЗПД	62,83	0,16	80	0	44	41,9
УЗПД	62,83	0,13	80	0	44	41,9
УЗПД	62,83	0,07	80	0	46	41,9
УЗПД	62,83	0,05	80	0	48	48,3
УЗПД	62,83	0,1	120	0	47	51,6

Окончание табл. П.3.2

УЗПД	62,83	0,1	100	0	45	45,1
УЗПД	62,83	0,1	80	0	44	41,9
УЗПД	62,83	0,1	60	0	39	25,8
УЗПД	62,83	0,1	40	0	34	9,6
УЗПД	62,83	0,1	20	0	34	9,6
AB	62,83	0,1	120	0	46	48,3
AB	62,83	0,1	100	0	47	51,6
AB	62,83	0,1	80	0	48	54,8
AB	62,83	0,1	60	0	47	51,6
AB	62,83	0,1	40	0	48	54,8
AB	62,83	0,1	20	0	52	67,7

П.3.3. Микротвёрдость образцов из сплава 10895 после обработки

Технология	V_V ,	S,	<i>P</i> , H	β , $^{\circ}$	HV,	ΔHV, %
	м/мин	мм/об			МПа	
УЗПД	62,83	0,1	160	0	178	42,4
УЗПД	62,83	0,1	140	0	172	37,6
УЗПД	62,83	0,1	120	0	176	40,8
УЗПД	62,83	0,1	100	0	180	44
УЗПД	62,83	0,1	80	0	192	53,6
УЗПД	62,83	0,1	60	0	175	45,6
УЗПД	62,83	0,1	40	0	153	31,2
УЗПД	62,83	0,1	20	0	141	12,8
AB	62,83	0,1	160	0	171	36,8
AB	62,83	0,1	140	0	168	34,4
AB	62,83	0,1	120	0	172	37,6
AB	62,83	0,1	100	0	181	44,8
AB	62,83	0,1	80	0	169	35,2
AB	62,83	0,1	60	0	157	25,6
AB	62,83	0,1	40	0	146	16,8
AB	62,83	0,1	20	0	137	9,6

П.3.4. Микротвёрдость образцов из сплава Л68 после обработки

Технология	V_V ,	S,	<i>P</i> , H	β , $^{\circ}$	HV,	ΔHV, %
	м/мин	мм/об			МΠа	
УЗПД	62,83	0,1	160	0	236	57,3
УЗПД	62,83	0,1	140	0	217	44,7
УЗПД	62,83	0,1	120	0	210	40,0
УЗПД	62,83	0,1	100	0	203	35,3
УЗПД	62,83	0,1	80	0	203	35,3

Окончание табл. П.3.4

УЗПД	62,83	0,1	60	0	184	22,7
УЗПД	62,83	0,1	40	0	192	28,0
УЗПД	62,83	0,1	20	0	177	18,0
AB	62,83	0,1	160	0	202	34,7
AB	62,83	0,1	140	0	194	29,3
AB	62,83	0,1	120	0	183	22,0
AB	62,83	0,1	100	0	169	12,7
AB	62,83	0,1	80	0	161	7,3
AB	62,83	0,1	60	0	154	2,7
AB	62,83	0,1	40	0	164	9,3
AB	62,83	0,1	20	0	155	3,3

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Проректор НГТУ
по работе

к.т.н. А.И. Отто

2023 г.

AKT

о возможности использования результатов диссертационной работы

Технология ультразвукового поверхностного пластического деформирования металлов и методические указания по подготовке образцов, приведённые в диссертационном исследовании Самуль А.Г., могут быть использованы при обработке корпусов теплонагруженных СВЧ усилителей мощности, где требуется обеспечить минимальное отклонение формы и малую шероховатость поверхности.

Результаты диссертационного исследования Самуль А.Г. могут быть внедрены в АО "НПО НИИИП-НЗиК", г. Новосибирск.

Данный акт не является основанием для взаимных финансовых расчётов.

Начальник СКБ-1,

K.T.H.

Д.С. Вильмицкий

Декан механико-технологического факультета к.т.н., доцент

А.Г. Тюрин

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения результатов диссертационной работы



AKT

За период с 08.12.2021 по 17.12.2021 на АО «Авиаагрегат» аспирантом Самуль А.Г. отработан и внедрён процесс ультразвукового алмазного выглаживания на детали из титанового сплава ВТ3-1 «Поршень со штоком 476.01.5585.053.000», а также детали с хромовым покрытием «Шток 14800.4203.102.000».

Начальник лаборатории технологических проблем, д.т.н., профессор каф. сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета им. С.П. Королёва

Букатый А.С.

____ 2021 г.

приложение е

Акт использования результатов диссертационной работы в учебном процессе

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе Новосибирского государственного

технического университета

к.т.н., понеит

С.С. Чернов

08» апреля 2023 г.

использования результатов диссертационной работы

аспиранта Самуль А.Г. в учебном процессе

Диссертационная работа Самуль Артёма Геннадьевича посвящена формированию качества поверхностного слоя деталей, выполненных из цветных металлов и сплавов, ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием. В работе показано, что применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования приводит к уменьшению высотных, увеличению шаговых параметров шероховатости поверхности, повышению физикомеханических свойств поверхностного слоя деталей, выполненных из цветных металлов и сплавов. В результате обработки наблюдается увеличение износостойкости изделий.

В процессе подготовки диссертационной работы Самуль А.Г. проведён комплекс теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых формированию параметров качества поверхностного слоя изделий методом ультразвукового поверхностного пластического деформирования. Результаты исследования опубликованы в российских журналах, рекомендованных ВАК, в международных журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, а также представлены на всероссийских и международных конференциях.

Результаты диссертационной работы, полученные Самуль А.Г, используются в учебном процессе на механико-технологическом факультете Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистрантов, обучающихся по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (в лекционном курсе, а также на практических занятиях и лабораторных работах по дисциплине "Основы электрофизических методов обработки").

Декан механико-технологического факультета, к.т.н., доцент 0

А.Г. Тюрин