

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии машиностроения
(полное название кафедры)

Утверждаю

Зав. кафедрой д.т.н., профессор

Х.М. Рахимьянов

(подпись, инициалы, фамилия)

« » 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
по направлению высшего образования

15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение

(код и наименование направления подготовки магистра)

машиностроительных производств (Магистерская программа: Современные
технологии в машиностроении)

Механико-технологический факультет

(факультет)

Мажуга Семен Васильевич

(фамилия, имя, отчество студента – автора работы)

Управление качеством поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании

(полное название темы магистерской диссертации)

**Руководитель
от НГТУ**

Семенова Юлия Станиславовна

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

**Автор выпускной
квалификационной работы**

Мажуга Семен Васильевич

(фамилия, имя, отчество)

МТФ, Маг - 89

(факультет, группа)

(подпись, дата)

Новосибирск 2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии машиностроения
(полное название кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Рахмянов Х.М.
(фамилия, имя, отчество)

(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ
НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ**

студенту Мажуга Семену Васильевичу
(фамилия, имя, отчество)

факультета механико - технологического
(полное название факультета)

Направление подготовки 15.04.05 – Конструкторско – технологическое
(код и наименование направления подготовки магистра)
обеспечение машиностроительных производств

Магистерская программа Современные технологии в машиностроении
(наименование магистерской программы)

Тема Управление качеством поверхности при ультразвуковом пластическом
деформировании
(полное название темы)

Цели работы Установление взаимосвязей режимов ультразвукового поверхностного
пластического деформирования поверхностей деталей, работающих на трение, с
характеристиками смачиваемости обработанных поверхностей.

Задачи:

1. Выбор способа оценки степени смачиваемости поверхности на основе анализа существующих методик
2. Выбор режимов УЗПД поверхностей экспериментальных образцов на основе моделирования процесса формирования микрорельефа и установление геометрических параметров микрорельефа в зависимости от условий обработки.
3. Разработка комплекса технических решений, обеспечивающих проведение экспериментов на имеющемся оборудовании
4. Подготовка экспериментальных образцов и подбор смазочных материалов
5. Описание зависимостей формирования топографии микрорельефа от режимных параметров УЗПД и взаимосвязей характеристиками смачиваемости поверхностей;
6. Разработка рекомендаций по назначению режимов УЗПД, обеспечивающих смачиваемость поверхности

Задание согласовано и принято к исполнению.

**Руководитель
от НГТУ**

Семенова Юлия Станиславовна

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н, доцент.

(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

Студент

Мажуга Семен Васильевич

(фамилия, имя, отчество)

МТФ, Маг - 89

(факультет, группа)

(подпись, дата)

Тема утверждена приказом по НГТУ № 5094/2 от «15» _____ октября _____ 2018 г.

изменена приказом по НГТУ № _____ от «___» _____ 201__ г.

Диссертация сдана в ГЭК № _____, тема сверена с данными приказа

(подпись секретаря государственной экзаменационной комиссии по защите ВКР, дата)

(фамилия, имя, отчество секретаря государственной
экзаменационной комиссии по защите ВКР)

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является установление взаимосвязей режимов ультразвукового поверхностного пластического деформирования (УЗПД) поверхностей деталей, работающих на трение, с характеристиками смачиваемости обработанных поверхностей.

Данная работа включает в себя: литературный обзор, раздел посвящённый методике исследования и использованному оборудованию, раздел посвящённый экспериментальным исследованиям, список литературы из 50 источников.

Первая глава посвящена рассмотрению теории смачиваемости, её применению в машиностроительных целях, достоинствах управления смачиваемостью, способах реализации управления смачиваемостью, достоинствах и недостатках используемых способов.

Вторая глава описывает методы качественной и количественной оценки смачиваемости поверхностей, наиболее подходящих для цели исследования; используемое для подготовки и проведения экспериментальной части оборудование и оснастку, их технические параметры; результаты проведённого моделирования процесса УЗПД, с целью определения рациональных режимов обработки подготавливаемых образцов; выбранные режимы обработки подготавливаемых для проведения экспериментальных исследований образцов.

Третья глава представляет собой описание проведённых экспериментальных исследований, направленных на оценку влияния УЗПД и варьирования его режимов на смачиваемость обработанных поверхностей,

Структура и объём работы. Данная диссертационная работа включает в себя 4 главы, 88 страниц основного текста, 33 рисунка. Литературных источников 50, 8 из которых – иностранные.

ANNOTATION

Ziel der Arbeit ist es, den Einfluss Verarbeitungsmodi der plastischen Ultraschallverformung auf die Benetzbarkeit von Oberflächen zu ermitteln.

Diese Arbeit besteht aus einer Literaturübersicht, einem Abschnitt über methodische Forschung und verwendete Ausrüstung, einem Abschnitt über experimentelle Forschung und einer Literaturzusammenstellung, die 50 Quellen enthält.

Das zweite Kapitel beschreibt Methoden zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Benetzbarkeit von Oberflächen; Werkzeugmaschinen- und technologische Ausrüstungen, die im Laufe der Arbeit verwendet werden, ihre technischen Parameter. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Simulation des Prozesses der plastischen Ultraschallverformung vorgestellt. Basierend auf den Simulationsergebnissen werden rationale Verarbeitungsmodi von experimentellen Proben zugewiesen.

Das dritte Kapitel beschreibt die experimentellen Untersuchungen. Die Prüfungen zielten darauf ab, die Auswirkung der plastischen Ultraschallverformung zu bewerten und ihre Verarbeitungsmodi auf die Benetzbarkeit der behandelten Oberflächen zu variieren.

Struktur und Umfang der Arbeit. Die Dissertation besteht aus 4 Kapiteln, 88 Seiten des Haupttextes, 33 Abbildungen. Literaturquellen 50, von denen 8 ausländisch sind.

Содержание

1	Обеспечение повышенной смачиваемости рабочих поверхностей.....	7
1.1	Понятие смачиваемости, краевых углов, гистерезиса смачивания	8
1.2	Преимущества достижения повышенных показателей смачиваемости. Сферы применения	15
1.3	Методы получения поверхностей с повышенной смачиваемостью.....	17
1.3.1	Применение поверхностно - активных веществ (ПАВ).....	18
1.3.2	Оксидирование	19
1.3.3	Поверхностное пластическое деформирование.....	19
1.4	Ультразвуковое пластическое деформирование как способ повышения смачиваемости рабочих поверхностей	24
1.4.1	Достоинства и недостатки метода	24
1.4.2	Параметры и режимы ультразвукового пластического поверхностного деформирования	26
1.4.3	Формирование эксплуатационных свойств поверхностей деталей применением УЗПД	27
1.4.4	Формирование наклёпанного слоя, возникновение остаточных сжимающих напряжений	27
1.4.5	Формирование топографии поверхности.....	29
1.4.6	Образование волнистости	31
	Выводы по 1 главе.....	39
2	Методики, оборудование	40
2.1	Методы оценки смачиваемости поверхностей	40
2.1.1	Определение краевых углов методом пластины Вильгельми	41
2.1.2	Методы сидячей капли и его вариации	42
2.1.3	Метод прижатой капли	47
2.1.4	Метод прикрепления пузырька	48

2.1.5	Метод определения степени смачиваемости по скорости растекания масляного пятна	49
2.2	Оборудование, применяемое для осуществления УЗПД, его параметры	51
2.3	Моделирование результатов ультразвукового пластического деформирования.....	58
2.3.1	Параметры формируемого микро- и макрорельефов	58
2.3.2	Выбор режимных параметров обработки для проведения экспериментальных исследований.....	61
2.4	Подготовка экспериментальной установки	68
2.5	Выбор масла, применяемого для проведения экспериментов	69
2.5.1	Моторные масла	71
2.5.2	Трансмиссионные масла	74
2.5.3	Индустриальные масла	76
	Выводы по 2 главе.....	81
3	Экспериментальное исследование зависимости маслосъемкости формируемого рельефа от режимов УЗПД.....	82
3.1	Подготовка образцов перед обработкой УЗПД	82
3.2	Определение размера капель масла, используемых в экспериментах ...	83
3.2	Оценка смачиваемости обработанных поверхностей	89
3.3	Анализ полученных результатов.....	91
3.4	Рекомендации по назначению режимов ультразвукового поверхностного пластического деформирования	93
	Выводы по 3 главе.....	94
	ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	95
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	98

ВВЕДЕНИЕ

В рамках современного машиностроения, увеличение срока службы деталей машин, и тем самым уменьшение стоимости обслуживания, ремонта и их периодичности является важной задачей.

Долговечность узлов трения зависит от множества факторов, таких как конструктивного решения, технологии изготовления деталей, режимы нагрузки и смазки, соблюдение условий и правил технической эксплуатации машин.

По статистике, причиной 70–80 % всех отказов машин является износ узлов трения. Знание этого факта, открывает множество возможностей для реализации управления износом узлов трения различными способами.

Широко применяемыми на данный момент являются следующие методы повышения износостойкости: использование более износостойких материалов, изменения геометрических характеристик сопряжённых поверхностей, модификация поверхностей трения, ультразвуковая обработка, термические, электрохимические и механические методы обработки. При этом износостойкость обработанных поверхностей при использовании данных методов обеспечивается не только непосредственным упрочнением и нанесением износостойких покрытий, но и управление смачиваемостью.

Одним из наиболее перспективных методов, позволяющих управлять смачиваемостью обработанных поверхностей в широком диапазоне, является ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УЗПД). Создание с его помощью регулярных сложных микрорельефов способно значительно улучшить смачиваемость поверхностей, облегчая условия смазывая, тем самым увеличивая ресурс детали и механизма в целом.

Суть процесса заключается в деформационном дробном воздействии на поверхности обрабатываемого изделия с ультразвуковой частотой (22 ...66

кГц) и малыми амплитудами (5 – 30 мкм) [1]. Обработка производится как тел вращения, так и плоскостей. В рамках данной работы рассматривается обработка по токарной схеме.

В настоящее время тема управления смачиваемостью поверхностей, посредством УЗПД мало изучена и описана, вследствие чего, применение метода и получение позитивных результатов применения метода затруднено.

В связи с этим, **целью** работы является установление взаимосвязей режимов ультразвукового поверхностного пластического деформирования поверхностей деталей, работающих на трение, с характеристиками смачиваемости обработанных поверхностей.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих **задач**:

1. Выбор способа оценки степени смачиваемости поверхности на основе анализа существующих методик
2. Выбор режимов УЗПД поверхностей экспериментальных образцов на основе моделирования процесса формирования микрорельефа и установление геометрических параметров микрорельефа в зависимости от условий обработки
3. Разработка комплекса технических решений, обеспечивающих проведение экспериментов на имеющемся оборудовании
4. Подготовка экспериментальных образцов и подбор смазочных материалов
5. Описание зависимостей формирования топографии микрорельефа от режимных параметров УЗПД и взаимосвязей характеристиками смачиваемости поверхностей
6. Разработка рекомендаций по назначению режимов УЗПД, обеспечивающих смачиваемость поверхности

1 Обеспечение повышенной смачиваемости рабочих поверхностей

Обеспечение таких показателей надёжности как долговечность и безотказность является важными задачами при производстве машин и механизмов различных сфер применения. Значение этих показателей надёжности возрастает вместе с ростом стоимости последствий возникновения отказа механизмов и машин. По этой причине, машиностроительная отрасль заинтересована в изысканиях способов повышения надёжности машин. Среди множества способов обеспечения показателей надёжности является управление смачиваемостью рабочих поверхностей деталей машин. Повышение смачиваемости означает облегчение условий смазывания агрегатов, что положительно сказывается на надёжности механизмов.

Среди способов обеспечения высокой степени смачиваемости рабочих поверхностей в различных отраслях промышленности можно выделить следующие:

- 1) В обработке металлов резанием – создание искусственного микрорельефа для управления степенью смачивания поверхностей режущей части инструмента. Создание сложного микрорельефа несёт функцию уменьшения сил трения в паре «передняя поверхность – стружка». При рассмотрении резания, процесс стружкообразования рассматривают как процесс натекания жидкости большой вязкости на режущий клин. Создание благоприятных условий смачивания (гидрофобность или гидрофильность) в зависимости от режима резания (черновое или чистовое точение, соответственно) существенно способствует повышению ресурса резцов. Для целей снижения трения при резании формируют микрорельеф определённых характеристик на поверхности транспортировки стружки режущей пластины [2].

- 2) В производстве двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – нанесение на поверхности поршневых колец пористых хромовых покрытий с целью снижения вероятности образования задиров в процессе приработки. Пористые структуры обладают высокой степенью смачиваемости, благодаря чему обладают повышенной способностью удерживать смазку. Результатом применения является короткий срок приработки и увеличенная долговечность ДВС [3].
- 3) При изготовлении деталей механизмов и машин, работающих на трение – нанесение на поверхность (например, вкладышей подшипников) плёнок фосфорнокислых солей с целью защиты от задиров путём повышения смачиваемости [4].

Вышеперечисленные примеры применения принципов управления смачиваемостью рабочих поверхностей деталей машин и инструмента, говорят об актуальности обеспечения повышенной смачиваемости.

1.1 Понятие смачиваемости, краевых углов, гистерезиса смачивания

Смачивание представляет собой процесс физического взаимодействия жидкости с поверхностью твёрдого тела или другой жидкости. Соответственно, смачиваемость – мера этого взаимодействия.

В зависимости от числа участвующих в процессе фаз различают иммерсионное и контактное случаи смачивания. Иммерсионное случай подразумевает полное погружение твёрдого тела в жидкость, то есть участие в процессе двух фаз – жидкости и твёрдого тела.

Контактное смачивание проявляет себя в случае участие трёх или четырёх фаз: твёрдого тела, газа и жидкости, или твёрдого тела, газа и двух различных жидкостей.

Характер протекания процесса смачивания этих двух случаев определяют физико – химические взаимодействия на поверхности раздела

фаз, участвующих в процессе смачивания. Так, характер иммерсионного смачивания определяется теплотой смачивания. В случае контактного смачивания определяющим фактором является краевой угол смачивания [4,5, 6, 7].

Поскольку, в работе рассматривается процесс смачивания в трёхфазной системе (тело – жидкость – газ), следует ограничиться рассмотрением контактного случая смачивания.

Для дальнейшего продвижения по теме необходимо рассмотреть понятие краевого угла смачивания. На рисунке 1 представлено схематичное изображение процесса смачивания горизонтальной поверхности твёрдого тела каплей жидкости. Капля для достижения равновесия принимает на смачиваемой поверхности форму тела вращения. Угол θ , между касательной к кривой, образующей поверхности капли, и смоченной поверхностью является краевым углом. То есть, краевой угол – угол наклона поверхности жидкости к смоченной поверхности тела. Он отсчитывается от касательной к образующей кривой капли в сторону жидкости, а его вершина располагается на линии смачивания, вдоль которой соприкасаются участвующие в смачивании фазы.

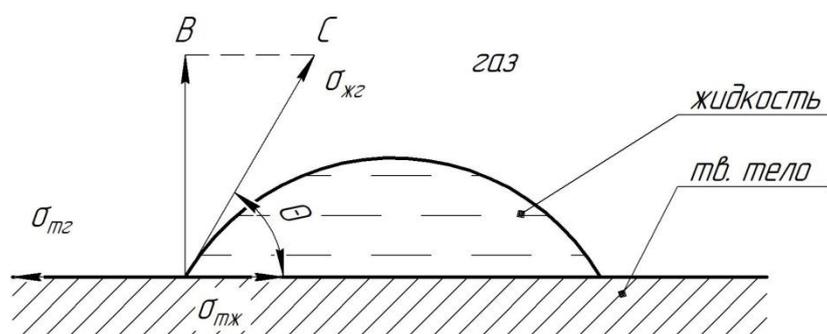


Рисунок 1 – Краевой угол в системе жидкость – твёрдое тело – газ.

Необходимо провести границу в понимании различий равновесных и неравновесных краевых углов. Равновесный краевой угол θ_0 зависит только от термодинамических свойств системы, а именно, от поверхностных натяжений на границе раздела фаз (характеристики поверхности раздела

находящихся в равновесии фаз, определяемой затраченной работой на образование единицы площади поверхности раздела фаз), участвующих в смачивании. Поэтому для каждой системы при данных внешних условиях равновесный угол имеет одно конкретное значение. Так, равновесный угол, измеряемый при смачивании одной поверхности, может принимать различные значения в зависимости от температуры, давления и прочих термодинамических условий, созданных во время измерения [4,5].

Неравновесными краевыми углами же называются углы, изменённые при отклонении системы от состояния термодинамического равновесия. Также, неравновесные краевые углы называют контактными. Краевые углы, изменяющиеся при растекании жидкости по поверхности твёрдого тела, называются динамическими θ_d . Для них характерно изменение при перемещении линии (в случае капли, периметра) смачивания. Зависимость динамических краевых углов от времени характеризует скорость растекания жидкости (скорости продвижения периметра смачивания).

Расчёт равновесных краевых углов подразумевает определённые допущения, связанные с состоянием смачиваемой поверхности. Поверхность считается гладкой, однородной и недеформируемой, что значительно отличается от реального состояния поверхностей тел. Наличие шероховатости, пор, микротрещин, неоднородность химического состава, наличие локальных деформаций твёрдой поверхности оказывают сильное влияние на процесс смачивания. Неоднородности твёрдой поверхности вызывают отклонение статических краевых углов от равновесного значения. Тем самым, неоднородности поверхностей твёрдых тел влияют на проявление гистерезиса смачивания.

Под гистерезисом смачивания понимается способность жидкости иметь при контакте с твёрдой поверхностью несколько устойчивых статических краевых углов, отличных от равновесного.

Различают статический и кинетический формы гистерезиса смачивания.

Статический (порядковый) гистерезис проявляется в различии статических краевых углов при разной последовательности соприкосновения твёрдого тела с другими фазами, участвующими в смачивании. Статический гистерезис не зависит от времени контакта жидкости с твёрдым телом.

Кинетический гистерезис обуславливается наличием на поверхности смачиваемого твёрдого тела препятствий, являющихся энергетическими барьерами. Подобные барьеры затрудняют растекание жидкости и, тем самым, перемещению линии смачивания. При кинетическом гистерезисе краевые углы зависят от времени контакта фаз [4, 6].

Физико – химический гистерезис возникает вследствие одновременного со смачиванием протекания физико - химических процессов (адсорбции, испарения, растворения, химических реакций). Физико – химические реакции изменяют объём фаз, участвующих в смачивании и их свойства, в том числе, поверхностное натяжение на границах раздела фаз. При проявлении физико – химического гистерезиса краевые углы зависят от времени контакта фаз. Особенно сильно проявляется его влияние, когда время, в течение которого происходит физико – химический процесс сопоставим со временем измерения краевых углов. Соответственно, нивелирование влияния физико – химического гистерезиса на результат измерения краевых углов возможно варьируя время измерения краевых углов, сведя его к минимуму.

В рамках данной работы, следует сосредоточить внимание на случае кинетического гистерезиса смачивания, поскольку его закономерности лежат в основе методов проведения экспериментальной части.

При изучении явления гистерезиса смачивания вводятся понятия краевых углов натекания и оттекания (наступающие и отступающие углы).

Краевые углы натекания $\theta_{нт}$ формируются при натекании жидкости на твёрдую поверхность, то есть, при увеличении смоченной площади (рисунок 2). Краевые углы натекания образуются у передней кромки капли, находящейся на наклонной плоскости (рисунок 3).

Краевые углы оттекания $\theta_{от}$ образуются при оттекании жидкости с ранее смоченного участка твёрдой поверхности (рисунок 3), а также на наклонной поверхности у задней кромки капли.

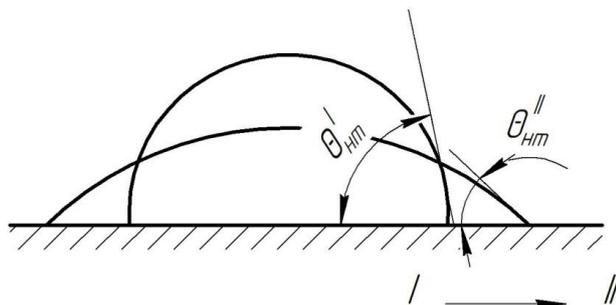


Рисунок 2 - Угол натекания при смачивании поверхности.

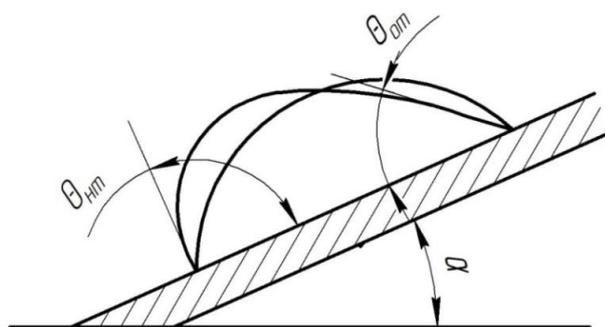


Рисунок 3 - Углы натекания и оттекания капли на наклонной поверхности.

Рассмотрение кинетического гистерезиса смачивания неотрывно от рассмотрения факторов на него влияющих. Представляющим наибольший интерес в рамках данной работы фактором является шероховатость поверхности.

Реальная поверхность отличается от идеальной наличием неровностей, измеряемых в широких пределах (от величин, кратных межатомному расстоянию до десятков микрон, а в некоторых случаях – до нескольких миллиметров). Поскольку, реальная поверхность имеет микрорельеф,

отличный от идеального, Измерение истинного краевого угла не представляется возможным при измерении краевых углов оперируют понятием макрокраевой угол смачивания $\theta_{ш}$, представляющий угол наклона поверхности жидкости к плоскости, на который проецируется профиль твёрдой поверхности.

Наличие впадин и выступов микрорельефа увеличивает площадь смачиваемой поверхности кратно отношению реальной шероховатости, к шероховатости идеально гладкой поверхностью. Подобное отношение носит название - коэффициент шероховатости K . В связи с этим, кратно коэффициенту K возрастает адгезионное притяжение жидкости к твёрдой поверхности. Уравнение, описывающее условие механического равновесия сил на периметре смачивания при смачивании шероховатой поверхности, выглядит следующим образом:

$$\theta_{ш} = K \cos \theta_0,$$

где K – коэффициент шероховатости; θ_0 – равновесный угол смачивания; $\theta_{ш}$ – макрокраевой угол смачивания

Данное соотношение носит название уравнения Венцеля – Дерягина. Исходя из него можно сделать следующий вывод: В условиях смачивания ($90^\circ > \theta_0 > 0^\circ$), увеличение коэффициента шероховатости вызывает уменьшение макрокраевого угла $\theta_{ш}$. При достаточно большом коэффициенте шероховатости $K > 1/\cos \theta_0$ и $\cos \theta_0 < 90^\circ$ наблюдается полная смачиваемость [4 - 8].

Однако, существует ряд особенностей смачивания поверхностей, имеющих сложный микрорельеф. Следует рассмотреть эти особенности более подробно.

Так, в случае присутствия на смачиваемой поверхности сети сообщающихся микроканалов, значения краевых углов расходятся со значениями, рассчитанными теоретически. При помещении на такую поверхность капли, объём которой соизмерим с общим объёмом каналов,

пересекающих периметр смачивания, жидкость под воздействием капиллярных сил вытекает из капель вдоль канавок. При неизменной площади основания капли её объем уменьшится, что приведёт к уменьшению макрокраевого угла смачивания. Различие процесса вышеописанного процесса заключается ещё и в том, что скорость растекания значительно выше, нежели скорость протекания равновесного обратимого процесса.

Форму неровностей обычно характеризуют углом наклона α различных участков твёрдой поверхности к плоскости, на которую проецируется реальная поверхность (рисунок 4).

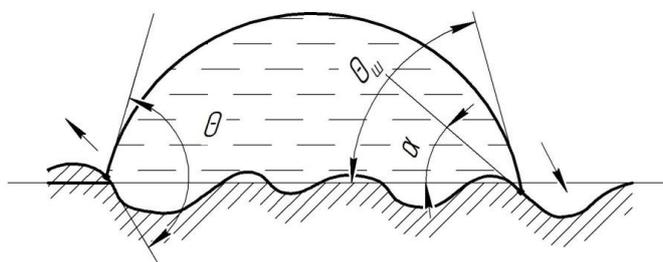


Рисунок 4 – Краевой и макрокраевой углы.

Наряду с крутизной микрорельефа большую роль играет также расположение микроканавок и микровыступов. Течение жидкости вдоль канавок происходит беспрепятственно и быстрее, чем на гладкой твёрдой поверхности.

Большое значение имеет направление растекания капли. При растекании капли перпендикулярно направлению микронеровностей макрокраевой угол в большей степени зависит от крутизны (угла наклона) различных участков твёрдой поверхности. Наличие шероховатостей на поверхности при таком сценарии смачивания может привести к образованию метастабильного состояния равновесия системы. Оно достигается при условии натекания капли через точку, в которой крутизна микрорельефа максимальна. При этом, в той же точки наблюдается минимальный краевой угол. $\theta_{д \min} = \theta_{ш} - \alpha_{\max}$. Дальнейшее перемещение линии смачивания в пределах этой же канавки приводит к увеличению динамического краевого угла. Перемещение капли возможно только в том случае, если происходит

непрерывное уменьшение динамического краевого угла. В общем случае, перемещение прекращается в момент, если в каких – либо двух положениях линии смачивания краевые углы больше, чем в промежуточном положении.

Таким образом, шероховатость смачиваемой поверхности является одной из главных причин возникновения гистерезиса смачивания [4-8].

Таким образом, шероховатость оказывает влияние на величину краевых углов смачивания. Большей шероховатости соответствует большая степень смачиваемости и наименьший краевой угол. Наличие сложного микрорельефа способно вызывать отклонения от стандартного сценария смачивания, в сторону проявления улучшенных свойств смачиваемости даже при малой величине шероховатости. В первую очередь отмечена зависимость величины краевого угла от крутизны микрорельефа α . При наличии наибольшей крутизны наблюдается наименьший угол смачивания. При достижении в точке текущего элемента микрорельефа значений α_{\max} , большего, чем у предшествовавших, может наблюдаться резкое повышение динамического угла и образование метастабильного состояния капли.

Следует отметить, что под сложным микрорельефом понимается сеть сообщающихся микроканалов с определённой высотой микронеровностей.

Таким образом, при управляемом создании микрорельефа, конфигурация которого будет соответствовать благоприятным значениям смачиваемости, становится возможным обеспечить улучшенные свойства смачивания у деталей при сохранении относительно малой шероховатости.

1.2 Преимущества достижения повышенных показателей смачиваемости. Сферы применения

Все имеющиеся преимущества повышенного показателя смачиваемости стоит рассматривать с точки зрения триботехники.

Триботехника – наука о контактном взаимодействии твёрдых тел при их относительном смещении. Данная наука рассматривает вопросы трения, изнашивания и смазки. Именно через рассмотрение этих вопросов находится главное решение вопроса надёжности механизмов, в состав которых входят пары трения.

Среди негативных последствий недостаточного смазывания рабочих поверхностей деталей пар трения и, как следствия преждевременного износа, можно выделить:

- Потеря кинематической точности механизма
- Снижение мощности агрегатов, в которые входят изношенные узлы
- Снижение производительности агрегатов
- Возникновение вероятности утечки рабочих жидкостей
- Повышение расхода смазочных материалов вследствие преждевременного износа рабочих поверхностей
- Повышенный расход электроэнергии агрегатами
- Снижение способности сопротивлению усталостному разрушению

Поскольку ни одна сфера жизни не обходится без применения различных машин и механизмов, от которых зависит равномерность и постоянство течения деятельности, остро стоит вопрос обеспечения наибольшей долговечности механизмов. Эта задача разрешается посредством управления изнашиванием, одним из видов которого является обеспечение повышенных олеофильных свойств поверхностей пар трения, поскольку наличие даже малых смазочных плёнок (до 0,1 мкм) способно снизить силу трения в 10 раз, снижая при этом износ до 1000 раз [9].

При рассмотрении темы следует учитывать, что увеличение коэффициента смачивания поверхности как способ повышения долговечности следует использовать только в условиях граничной и

полужидкостной смазки, так как в случае жидкостной смазки сила трения в сопряжении не зависит от природы сопрягаемых поверхностей, вследствие большой толщины масляной плёнки.

Исходя из вышесказанного, обеспечение повышенной смачиваемости напрямую влияет на режим смазки в положительном ключе. Повышенная смачиваемость способствует в значительной степени повышению долговечности нагруженных пар трения и, косвенно влияет на долговечность расположенных рядом узлов, посредством снятия с них температурной нагрузки, возникающей из-за близкого расположения с тяжело нагруженным узлом трения.

Отмечается [10], что наиболее часто с целью обеспечения повышения степени смачиваемости применяются методы нанесения покрытий. Основным недостатком большинства покрытий является их непродолжительный срок службы, что негативно сказывается на продолжительности сохранения положительного эффекта применения обработки.

Наибольшая важность хорошей смачиваемости наблюдается в условиях граничной и полужидкостной смазки, при которых из-за малых толщин смазочных слоёв становятся важным сохранение целостной и стабильной смазывающей плёнки.

1.3 Методы получения поверхностей с повышенной смачиваемостью

Существует несколько способов повышения степени смачиваемости поверхностей деталей машин:

- Применение поверхностно – активных веществ
- Оксидирование
- Поверхностное пластическое деформирование

Ниже, представлено рассмотрение каждого из перечисленных методов более

подробно.

1.3.1 Применение поверхностно - активных веществ (ПАВ)

Поверхностно – активные вещества (ПАВ) относятся к химическим соединениям, способствующим уменьшению поверхностного натяжения, при нахождении на границе раздела фаз в определённой концентрации.

Применение поверхностно – активных веществ в качестве присадок или покрытий необходимо для уменьшения поверхностного натяжения смазочного материала, применяемого в парах трения. За счёт снижения поверхностного натяжения улучшается адгезия смазочного материала и смазываемой поверхности. Смачиваемость поверхности значительно улучшается, поскольку сам процесс смачивания является последствием адгезионного взаимодействия смазочного материала и твёрдой подложки [1, 11, 12, 13].

Существуют два различных метода применения ПАВ:

- Нанесение на контактирующие поверхности
- Введение в качестве присадок в смазочный материал

Одной из наиболее часто применяемых ПАВ для целей повышения степени смачиваемости поверхности является эпиламирующие покрытия, в состав которых входят фторосожающие поверхностно – активные вещества.

Нанесение покрытия не подразумевает структурных изменений материала детали. Само нанесение происходит путём испарения растворителей и, последующей хемсорбции между молекулами ПАВ и обрабатываемой поверхностью. Покрытие способно развивать сильные адгезионные связи с материалом подложки.

Слой покрытия мал и достигает величин в диапазоне от 40 до 80 А. Поскольку покрытие является мономолекулярным, его наличие не изменяет геометрические размеры изделия.

Основным недостатком эпиламирующих покрытий является низкая рабочая температура, вследствие чего их применение ограничено приборостроением и часовым производством [11,12, 13].

1.3.2 Оксидирование

Одним из способов улучшения смачивания является создание оксидных покрытий на поверхностях, работающих в условиях трения.

Искусственно созданная на стальных поверхностях пористая мягкая оксидная плёнка окиси железа (Fe_3O_4) имеет хорошее сцепление с основой и обладает повышенной способностью удерживать смазку.

Наличие такой плёнки предотвращает заедание, а её разрушение создаёт мелкий абразив, улучшающий приработку деталей узла.

Плёнку получают различными методами: химическим, электрохимическим, термическим и термохимическим.

Наиболее часто применяют электрохимический способ получения оксидных плёнок. Толщина таких плёнок может достигать 0,3 мм. Для их получения применяется метод глубокого анодирования.

Недостатками данного способа повышения является увеличение размеров детали за счёт наращивания покрытия на поверхности детали и свойство покрытия разрушаться в ходе работы изделия. Также, значительным недостатком является малая стойкость оксидного покрытия к циклическим нагрузкам [11, 14, 15].

1.3.3 Поверхностное пластическое деформирование

Группа методов обработки, объединённая под названием поверхностное пластическое деформирование (ППД) имеет широкое применение, поскольку позволяет изменять свойства поверхностного слоя,

улучшая эксплуатационные характеристики поверхностей. Не менее важным является свойство методов этой группы формировать новый микро – и макрорельеф, различных конфигураций. Возможность формирования нового микро – и макрорельефа требует более подробного рассмотрения.

Наиболее часто применяемыми методами ППД являются дробеструйная обработка, обкатывание, вибрационная обработка, выглаживание и ультразвуковое поверхностное деформирование.

Выбор наиболее рационального способа обработки должен исходить из соображений возможности обеспечить повышенную смачиваемость трущихся поверхностей деталей машин при сохранении малой шероховатости, в совокупности с наделением поверхностных слоёв улучшенными характеристиками усталостной прочности и сниженным сроком приработки является перспективной при повышении надёжности машин и механизмов.

Дробеструйная обработка представляет собой процесс обработки поверхностей абразивом в виде дроби, подаваемым на обрабатываемую поверхность посредством сжатого воздуха. Результатом обработки является получение упрочнённого поверхностного слоя детали, остаточных сжимающих напряжений. Кроме того, существует возможность повышения адгезионной способности поверхностей, что позволяет применять данный метод в качестве подготовки поверхности к нанесению различных покрытий [16, 17].

Однако, у данного метода существует ряд недостатков. Одним из них является необходимость проведения обработки в специальном контейнере или камере при обработке всей детали, а в случае обработки одной поверхности обособленно - изолирование остальной детали специальной оснасткой. Кроме того, существуют ограничения по размерам обрабатываемой детали. Также, серьёзным недостатком является малая производительность обработки, ограниченная возможностями оборудования.

Обкатыванием роликами и шариками поверхностей деталей добиваются упрочнения поверхностного слоя, разглаживания шероховатости. Процесс сопровождается уменьшением размеров детали на величину остаточной деформации. Также ограничено применение метода для неравножестких деталей [16, 17].

Вибрационная обработка является методом упрочняюще – чистовой обработки. Отличие от обкатывания заключается в наложении на ролик колебаний и снижением статической нагрузки на обрабатываемую поверхность за счет добавления динамической составляющей. Метод позволяет образовать маслоёмкие микрорельефы. Недостатком метода является рабочая температура процесса. Температура обрабатываемой поверхности может достигать 1000 – 1200 °С.

Алмазное выглаживание также является упрочняюще – чистовым методом обработки. Пластическое деформирование поверхностного слоя скольжением выглаживателя вызывает упрочнение обрабатываемой поверхности, выглаживание шероховатости, следов предшествовавшей обработки. При этом шероховатость снижается в несколько раз. Этим способом возможно получение регулярного маслоёмкого микрорельефа, однако для этого необходимо задать инструменту дополнительные возвратно – поступательные колебания, что значительно усложняет как кинематическую схему установки, так и задание режимов обработки [16, 17, 18].

Ещё одним методом ППД является ультразвуковое пластическое деформирование (УЗПД). Данный метод представляет интерес возможностью формирования регулярного и частично регулярного маслоёмких микрорельефов. Данный вид обработки имеет как ряд очевидных преимуществ, так и ряд особенностей, влияющий на результат обработки. УЗПД по сравнению с другими методами ППД обладает следующими преимуществами [16, 17]:

- Сниженный срок приработки обработанных поверхностей
- Малые статические нагрузки на обрабатываемую поверхность
- Относительно малые температуры, развиваемые при обработке (менее 300 °С)

Данный метод с точки зрения улучшения условий смазки интересен по нескольким причинам. Первая причина заключается в получении постоянного микрорельефа, состоящего из взаимоперекрывающихся пологих многогранных единичных отпечатков (рисунок 5). За счёт этих отеснённых на поверхности детали отпечатков возможно создание запаса смазки, что способно облегчить режим смазывания.

Вторым достоинством является создание сети сообщающихся микроканалов, полученных при продвижении инструмента. Исходя из теории смачивания, наличие подобных сложных микрорельефов способствует изменению характера смачивания поверхностей, уменьшая краевые углы, тем самым обеспечивая повышенную степень смачиваемости обработанной поверхности. В перспективе, использование УЗПД способно обеспечить обработанные поверхности олеофильными свойствами с сохранением малой шероховатости. Кроме того, имеется возможность, путём варьирования режимов обработки, управлять смачиваемостью обработанной поверхности [4,16, 17, 18].

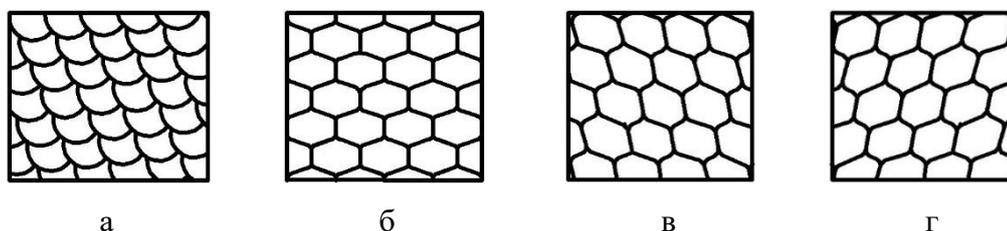


Рисунок 5 – Формы фрагментов регулярного микрорельефа, получаемые УЗПД

а – проекция четырёхугольника; б – симметричный шестиугольник; в, г – неправильные шестиугольники

На основе проведённого анализа можно прийти к выводу о том, что с целью создания благоприятного режима смазывания применяются различные по реализации и способу действия методы.

Химическая обработка, направленная на снижение поверхностного натяжения ограничивается созданием мономолекулярных покрытий или внедрением присадок в смазочные материалы, при этом, не изменяя структуру материала детали. Сильная связь покрытия с подложкой обеспечивает долгий ресурс покрытию, однако достаточно низкая рабочая температура значительно ограничивает применимость подобных покрытий.

Методы, связанные с созданием металлизированных пористых покрытий на поверхности детали позволяют ускорить приработку с минимальными износными изменениями детали. Пористость покрытия естественным образом способствует повышенной смачиваемости. Стоит иметь в виду, что сокращение срока приработки происходит за счёт разрушения покрытия и его преобразование в мелкий абразив. Тем самым, наличие подобных покрытий на поверхностях деталей машин требует большего внимания к своевременной замене смазочных материалов.

Методы, связанные с пластическим деформированием поверхностных слоёв, способны обеспечивать обработанные поверхности комплексом полезных в эксплуатации свойств, в том числе, теоретически позволяя повысить смачиваемость обработанных поверхностей. Возможность комбинировать метод пластического деформирования с другими представленными методами открывает новые перспективы для обеспечения повышенной долговечности деталей машин.

Анализ методов показал, что УЗПД является наиболее перспективным методом механической обработки, наиболее способствующим улучшению эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей пар трения. Внедрение метода в производство пар трения может значительно повлиять на качество готовой продукции, её рабочий ресурс. Для большего понимания

особенностей, достоинств и недостатков, метод ультразвукового пластического деформирования следует рассмотреть более детально.

1.4 Ультразвуковое пластическое деформирование как способ повышения смачиваемости рабочих поверхностей

Метод ультразвукового пластического деформирования УЗПД применим для решения широкого перечня технологических задач, начиная от обеспечения малой шероховатости и повышенной усталостной прочности, и, заканчивая возможностью управления смачиваемостью обработанных поверхностей, что в перспективе может сказываться на износостойкости обработанной детали, её рабочем ресурсе.

Таким образом, УЗПД как перспективный метод обработки требует более детального рассмотрения с точки зрения его достоинств, недостатков, влияющих на процесс режимных параметров, особенностей и получаемых результатов.

1.4.1 Достоинства и недостатки метода

Ультразвуковая обработка отличается от статических методов наличием ультразвуковых колебаний инструмента. Прижатие инструмента обеспечивается статическим усилием $F_{ст}$. Ультразвуковую обработку отличают следующие достоинства:

- Повышенная интенсивность обработки
- Прилагаемая статическая сила незначительна, относительно статических методов, что позволяет обрабатывать неравножесткие детали
- Скорость деформирования переменная, максимальное значение достигает 200 м/мин и более

- Развиваемое в поверхностном слое детали среднее давление в 3...5 раз больше такового при обкатывании
- Температура и время нагрева поверхностного слоя до 5 раз меньше, чем при обкатывании
- В большинстве случаев, благодаря высокой плотности дислокаций и дисперсности блоков, обусловленной многократным приложением нагрузки и перекрыванием отпечатков, степень наклёпа превосходит таковую при обкатывании до 1,5 раз. [16, 17]

Исходя из материалов статьи [19], при ультразвуковой обработке поверхностей образцов из стали 45 с приложением статического усилия $F_{ст} = 50$ Н, максимальная микротвёрдость $H_{ц}$ на глубине до 5 мкм составит около 4000 МПа, что в два раза превышает таковую для исходной поверхности. Значения микротвёрдости, свойственные необработанной поверхности, после обработки наблюдаются, начиная с глубины 30 мкм, что больше величины допуска размера детали, подлежащей обработке в рамках технического задания. Получение подобных результатов при минимальном статическом усилии делает метод ультразвуковой обработки наиболее предпочтительным для решения поставленных задач.

Основными недостатками метода являются сложность описания механизмов деформаций, происходящих при обработке, что усложняет моделирование процесса, сложность подбора режимов обработки, а также необходимость подбора режимов обработки для каждого отдельного материала.

Неполное соответствие модели реально происходящим процессам, не позволяет абсолютно точно предсказывать результат обработки, что требует производить поиск рациональных режимов путём итераций, отталкиваясь от рассчитанных в рамках модели режимов.

Результаты обработки зависят от множества параметров материала, таких как модуль упругости, твёрдость, коэффициент Пуассона. При этом

зависимости носят сложный характер, что затрудняет создание руководящих материалов по выбору режимов для групп металлов.

1.4.2 Параметры и режимы ультразвукового пластического поверхностного деформирования

Результаты ультразвуковой обработки, такие как величина шероховатости и глубина упрочнённого слоя и наличие волн пластического течения на обработанной поверхности являются следствием взаимозависимого сочетания кинематической (величины окружной скорости V , продольной подачи S) и силовой составляющих, влияющих на величину единичного отпечатка (статическое усилие $F_{ст}$, амплитуда A) процесса. Показателем, количественно характеризующим, как степень взаимосвязи составляющих, так и интенсивность воздействия на заданный материал в ходе обработки, является величина единичного отпечатка. Именно величина единичного отпечатка накладывает ограничения на режимы формообразования шероховатости.

Ключом к решению поставленных технологических задач является совокупность параметров, влияющих на процесс ультразвуковой обработки.

Следует перечислить параметры, влияющие на процесс ультразвуковой обработки:

Параметры, влияющие на величину единичного отпечатка:

Статическое усилие $F_{ст}$, Н – усилие поджатия инструмента к обрабатываемой поверхности, обеспечивающее силовое замыкание инструмент – обрабатываемая поверхность.

Амплитуда A , мкм – наибольшее отклонение инструмента от положения равновесия. Влияет на глубину и степень деформированности материала.

Параметры, влияющие на качество образованного микрорельефа:

$V_{\text{дет}}$ – окружная скорость детали, м/мин – значение, подбираемое из условия полного перекрытия отпечатков и создания нового микрорельефа без следов предыдущей обработки. Определяет величину расстояния между отпечатками в направлении скорости.

S – продольная подача, мм/об – значение, также подбираемое из условия полного перекрытия отпечатков по направлению вдоль оси детали [16, 17].

1.4.3 Формирование эксплуатационных свойств поверхностей деталей применением УЗПД

На основе имеющихся работ можно сделать вывод, что в результате ультразвукового пластического деформирования на обрабатываемой поверхности и в поверхностном слое происходят следующие процессы: образование наклёпанного поверхностного слоя и сжимающих остаточных деформаций; образование сложного регулярного и частично регулярного микрорельефа с малой шероховатостью, состоящего из взаимно перекрывающихся единичных отпечатков инструмента; в некоторых случаях формирование волнистости, возникающей как следствие пластического течения металла, вытесненного ударом инструмента в направлении движения подачи. Каждое из этих явлений следует рассмотреть более подробно.

1.4.4 Формирование наклёпанного слоя, возникновение остаточных сжимающих напряжений

Одним из достоинств ультразвукового пластического деформирования является образование наклёпа и остаточных напряжений сжатия, в связи с чем, значительно повышается твёрдость поверхности, её усталостная прочность, трещиностойкость и общая износостойкость. Следует

рассмотреть явление образования наклёпанного слоя и остаточных напряжений более подробно.

Механизм формирования наклёпанного поверхностного слоя построен на увеличении плотности дислокаций в объёме обрабатываемого материала. Увеличение плотности дислокаций происходит благодаря их активации и, как следствие, повышению их подвижности в объёме материала. Происходит это за счёт поглощения в местах дефектов кристаллической решётки и других структурных несовершенств, введённой при обработке акустической энергии. В результате происходит образование и перемещение дислокаций внутри кристаллов по плоскостям скольжения. В процессе взаимодействия дислокаций, вакансий и межузельными и примесными атомами, а также, в следствие дробления кристаллов материала на фрагменты возникают препятствия для протекания сдвиговых деформаций, что и создаёт упрочняющий эффект в обрабатываемом материале [20]. Согласно материалам работы [21] плотность дислокаций в недеформированных металлах составляет $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$. Обкатка роликом ведёт к повышению плотности до значений $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а при применении УЗПД до $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Значительное увеличение плотности дислокаций говорит как о продуктивности применения ППД в целом, так и о перспективности применения УЗПД в целях повышения эксплуатационных свойств изделий.

Основными режимными параметрами, определяющими степень наклепа являются амплитуда и статическое усилие, а среди параметров установки – радиус кривизны индентора. Кроме того, за счёт разного коэффициента перекрытия отпечатков, наклёп также можно регулировать, увеличивая или уменьшая расстояния между отпечатками в направлении скорости и подачи.

Помимо образования упрочнённого слоя, УЗПД способствует формированию остаточных сжимающих напряжений, вызываемых возникновением полей напряжений первого и второго родов в

деформированном материале. При этом, наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики деталей влияют остаточные напряжения первого рода, уравниваемые в объёме детали. Возникновение остаточных деформаций объясняется наличием упругих деформаций в элементарных объёмах, расположенных под слоем материала, подвергшимся пластической деформации. Пластически деформированный слой, препятствующий возвращению упругодеформированных элементарных объёмов, не позволяет релаксировать материалу под ним. Результатом такого взаимодействия слоёв материала является появление сжимающих напряжений в поверхностном слое.

1.4.5 Формирование топографии поверхности

Рассмотрение формирования нового микрорельефа следует начать с шероховатости, получаемой в ходе обработки.

Величина шероховатости поверхности, обработанной УЗПД уменьшается с увеличением амплитуды колебаний или усилия прижима. Варьируя эти два параметра в рамках допустимых диапазонов, возможно получение шероховатости поверхности меньших, по сравнению с исходной в десятки раз. Так в работе [21] рассмотрен случай обработки образца из стали 12Х18Н9Т с исходной шероховатостью $R_a = 25$ мкм. Посредством ультразвукового пластического деформирования удалось достичь значений шероховатости $R_a = 0,4$ мкм, что в 62,5 раза меньше. При этом возможно полное или частичное устранение следов предшествующей обработки, посредством их заглаживания, что положительно сказывается на эксплуатационных свойствах поверхностей.

Преимущество управляемости микрорельефа заключается в том, что он может влиять на фрикционные свойства поверхности, изменять способность удерживать жидкость на поверхности.

Согласно работе [22] форма фрагмента может принять один из четырёх видов (четырёхугольная, правильная шестиугольная, неправильная шестиугольная с различным наклоном). Вид фрагмента при этом будет определяться дробной частью числа отпечатков, укладываемых в один виток вращающейся детали.

При этом, степень вытянутости фрагментов зависит от соотношения кинематических параметров режимов обработки (рисунок б: а, б).

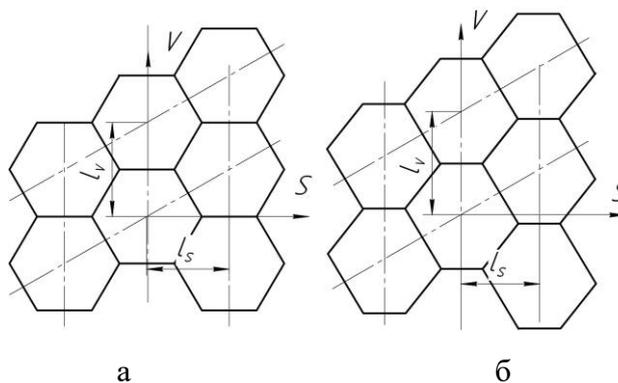


Рисунок б - Изменение формы фрагмента в зависимости от соотношения расстояний между соседними отпечатками в направлениях V и S.

Соотношение высоты фрагмента к его ширине влияет на равномерность геометрических свойств поверхности (шага в направлении V и S), что необходимо учитывать при обеспечении требуемой шероховатости.

Как ранее отмечалось, развитие сложного регулярного или частично регулярного микрорельефа, состоящего из взаимно перекрывающихся единичных отпечатков, имеющих определённый объём может благоприятно сказываться на условиях смазывания поверхностей пар трения. Создание запаса смазочной жидкости на поверхности при заполнении объёмов единичных отпечатков на поверхности способно обеспечить повышение ресурса обработанной УЗПД детали.

Форма единичного отпечатка с некоторыми допущениями может быть представлена в виде фрагмента сферы, ограниченного плоскостями, что подразумевает наличие пологих и покатых участков по пути продвижения

жидкости. В литературном анализе выше показано, что влияние угла наклона поверхности даже на уровне шероховатости способно вызывать изменение краевых углов, при достижении некоторых значений которых может наблюдаться как улучшение свойства смачиваться, так и установление метастабильного состояния равновесия жидкости с прекращением дальнейшего продвижения периметра смачивания. Также, создание сложных регулярных микрорельефов способно положительно сказаться на смачиваемости за счёт создания сообщающихся микроёмкостей, что может нивелировать снижения степени смачиваемости вследствие уменьшения шероховатости поверхности. Таким образом, задача управления формой и размерами фрагментов микрорельефа при УЗПД для обеспечения требований к маслостойкости поверхностей представляется актуальной.

1.4.6 Образование волнистости

Волнистость, образуемая на обрабатываемой методом УЗПД поверхности, следует считать элементом макрорельефа. Образующиеся волны имеют определённую высоту, а также периодичность витков и угол наклона. Перечисленные параметры определяются режимами обработки и условиями обработки. Для полноты понимания процесса, следует более подробно рассмотреть эту тему.

Такие макронеровности поверхности как волны формируются в результате возникновения очага деформации (ОД) в деформированном под действием индентора материале. Под ОД подразумевается зона в поверхностном слое изделия, внутри которой материал претерпевает процесс пластического течения вследствие контакта с деформирующим инструментом. В зависимости от интенсивности воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность профили ОД классифицируют по четырём видам. Возникновение очага первого вида происходит при незначительном

внедрении инструмента в материал. Такое воздействие приводит к частичному сглаживанию неровностей за счёт пластического осаживания их выступов и подъёма впадин. Характер контакта инструмента с заготовкой в очаге деформации первого вида прерывистый. Образование ОД второго вида происходит вследствие увеличения силового режима обработки, при котором деформируются не только неровности, но и основной металл. Итогом обработки при этом является зарождение пластической волны, высота которой не превышает высоты выступов шероховатости. В дальнейшем, повышение силового режима обработки приводит к росту волны и образованию ОД третьего вида. Особенностью ОД третьего вида является возвышение вершины волны над линией выступов исходной шероховатости. В случае возникновения условий, при которых высота волны становится чрезмерно большой, происходит разрушение материала в очаге, что характерно для ОД четвертого вида [23].

Вследствие периодического характера воздействия индентора на обрабатываемую поверхность при УЗПД, за период ультразвуковых колебаний проходит несколько фаз взаимодействия: начало контактирования, развитие деформации, упругое восстановление и выход индентора из контакта. За счёт дробности деформации и, при наличии перемещения инструмента, на различных участках поверхности возможно образование очагов деформации всех видов. В случае реализации УЗПД по токарной схеме, то есть при вращении обрабатываемой детали и наличии подачи инструмента, образуется двухсторонний ОД с неравномерным объёмом пластических зон, располагающихся по разные стороны относительно инструмента. Соотношение размеров контактных и внеконтактных зон определяется режимами обработки. Возникновение ОД происходит вследствие деформационного упрочнения материала. Увеличение плотности дислокаций приводит к возрастанию сопротивления металла пластической деформации.

Накопление дефектов при УЗПД происходит в основном на внеконтактной поверхности волны, что соответствует вершине волны. Локальное скопление дефектов на поверхности волны способствует повышению твёрдости материала и увеличению его сопротивляемости внешним воздействиям. В определённый момент времени упрочнение материала достигнет значения, при котором сформируется вершина волны, после чего инструмент начнёт соскальзывать с гребня, формируя его второй склон. По результатам работы [24] можно сделать вывод о том, что изменение технологических факторов значительно влияет на профиль очага деформации. При этом, наиболее важным фактором являются силы деформирования. Увеличение силы деформирования провоцирует рост всех элементов профиля ОД. Однако следует иметь в виду, что размеры очага деформации при одних и тех же значениях силы деформирования могут различаться в зависимости от диаметра обрабатываемой детали, радиуса индентора, приведённого радиуса контакта и свойств материала инструмента и обрабатываемой детали.

На рисунке 7 показано формирование макрорельефа в виде волн пластического течения на цилиндрических поверхностях обрабатываемого образца. Образование волн по сути является проявлением образования ОД третьего вида. Образованные волны распространяются по винтовым линиям с одинаковым шагом (в виде многозаходной винтовой линии).

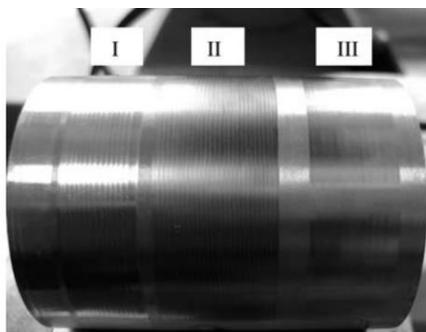


Рисунок 7 – Волнистость цилиндрических образцов, обработанных УЗПД.

Формирование волны происходит в направлении движения инструмента.

В работе [23] представлены следующие результаты по изучению зависимости интенсивности волнообразования от величины силового замыкания. Были получены следующие значения высот волн: на поверхности I высота волн составляет (7 ± 1) мкм при шаге $(0,72\pm 0,2)$ мм и числе заходов – 5; на поверхности II высота – (5 ± 1) мкм при шаге $(0,65\pm 0,2)$ мм и числе заходов – 6. При обработке с малым усилием (поверхность III) волнообразование не заметно невооруженным глазом. Высота волн на данном участке не превышает 2 мкм, величина шага нестабильна.

Таким образом, в работе [23] экспериментально подтверждается зависимость роста профиля ОД при увеличении силы деформирования. При этом рост замедляется по мере упрочнения поверхностного слоя материала. Приложение чрезмерных нагрузок на индентор может вызывать появление таких дефектов как поперечные волны пластического течения, направленные вдоль вектора скорости вращения детали. Ограничение максимальных значений статических усилий призвано предотвращать проявления подобного характера.

Существует вероятность нестабильного, с точки зрения геометрических параметров, образования волн течения. Причиной тому может послужить дрейф частоты ультразвуковых колебаний, вызываемых в свою очередь, нестабильностью работы генератора ультразвуковых колебаний установки при запуске без предварительного нагрева. В первые 10 минут работы генератора наблюдается падение частоты на 67 – 75 Гц, после чего происходит стабилизация процесса.

Опираясь на результаты исследований [24] можно прийти к выводу, что к значительным изменениям угла наклона волн α могут привести изменения частоты колебаний уже при отклонении в 50 Гц.

Устранение негативного влияния отклонений частоты возможно, посредством предварительного включения генератора ультразвуковых

колебаний с выдержкой на протяжении не менее 10 минут перед началом обработки заготовок.

Следует также рассмотреть влияние жёсткости технологической системы на выраженность волнообразования и его стабильность. Увеличение жёсткости системы СПИД путём замены заднего центра на более жёсткий позволяет значительно снизить разброс геометрических параметров образуемых волн.

С целью уменьшения величины волны и тем самым, создания относительно гладких рельефов чаще всего применяют следующие меры: увеличение скорости и подачи обработки в пределах допустимых диапазонов и применение наименьшего статического усилия, позволяющего обеспечить достаточное силовое замыкание для стабильного проведения обработки и устранения следов предшествующей обработки.

Первая мера приводит к уменьшению глубины наклёпанного слоя и глубины единичного отпечатка, что может привести к неполному перекрытию единичных отпечатков и неполному устранению следов предшествующей обработки. Поэтому, при увеличении скорости и подачи применяют многопроходную обработку, позволяющую компенсировать малую степень воздействия на материал. В результате получается относительно гладкий микрорельеф с волнами пластического течения малых высот в некоторых случаях, не различимых невооружённым глазом [24].

Полное исключение процесса волнообразования при обработке ультразвуковым пластическим деформированием по результатам исследований приведённых в работе [24] не представляется возможным в полной мере. На рисунках 8, 9 приведены графики, отражающие вероятность возникновения волн течения в результате УЗПД, в зависимости от твёрдости обрабатываемого материала.

На рисунке 8, приведённом ниже изображены кривые критических скоростей обработки образцов. Область режимов, расположенная ниже

представленных кривых обеспечивает образование волнистости на поверхности. Материал, участвующий в эксперименте имеет твёрдость НВ 2000 МПа, что соответствует стали 45. Соответственно, при увеличении твёрдости обрабатываемого материала графики сместятся ниже, уменьшая диапазон значений режимов, приводящих к образованию волн течения. Происходит это по причине снижения внедряемости индентора в материал при ударе, и как следствие, уменьшение диаметра пластического отпечатка, дробное наложение которых и провоцирует образование волн течения из вытесненного единичным ударом материала.

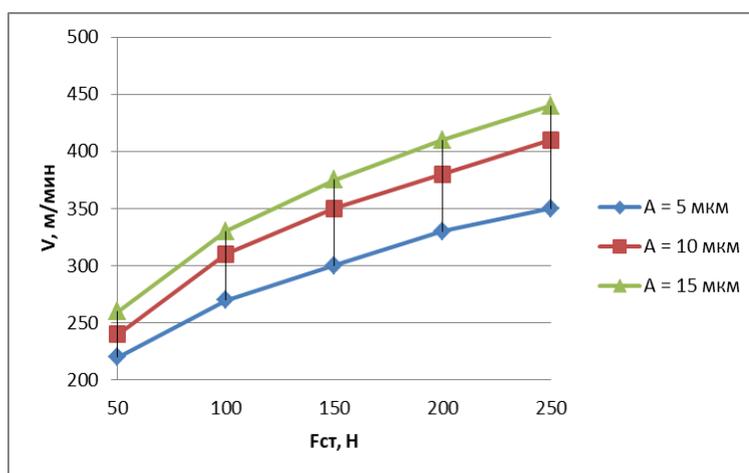


Рисунок 8 – Зависимость критической скорости обработки от прилагаемого статического усилия (НВ 2000 МПа Н; $D_c = 10$ мм; $f = 20$ кГц) [24].

Следующим немаловажным режимом обработки является величина подачи. На рисунке 9 представлены кривые, демонстрирующие влияние величины подачи на процесс волнообразования. Так, при обеспечении подачи от 0,1 мм/об и более, при амплитуде до 15 мкм позволяет предотвратить образование волн течения. Исходя из графика (рисунок 9), увеличение амплитуды колебаний ведёт к расширению диапазона режимов, ведущих к волнообразованию.

В работе также отмечен факт того, что обработка более твёрдых материалов ($HВ > 3500$ МПа) требует уменьшение величины подачи.

Исходя из проведенного анализа, следует, что при обработке деталей методом УЗПД, формируются неровности на макро, микро и субмикроуровне.

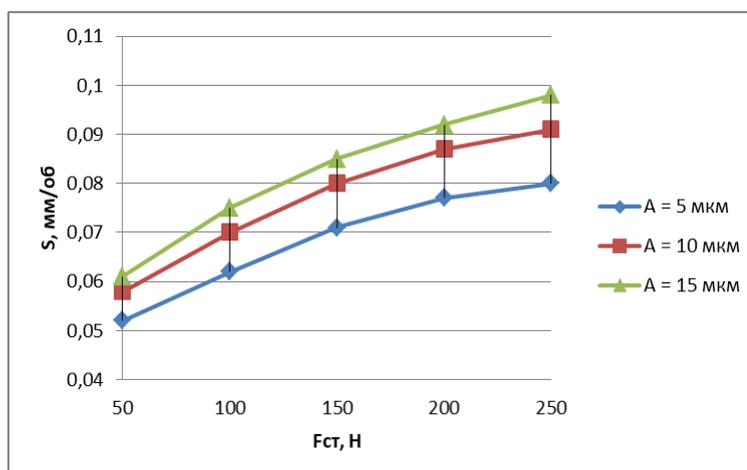


Рисунок 9 – Влияние статического усилия на величину критического значения подачи (НВ 2000 МПа; $D_c = 10$ мм; $f = 20$ кГц) [24].

В процессе формирования неровностей макроуровня на поверхности образуются волны течения деформированного металла, равномерно расположенные вдоль спиральных линий. Высота волн зависит от сил деформирования. Размеры фрагментов микрорельефа зависят от технологических режимов обработки и расположения элементов относительно элементов макроуровня, предположительно, из-за изменения степени деформирования материала вдоль ОД [24].

Широкому внедрению метода в производственные процессы затрудняется недостаточностью описания процессов образования микро – и макрорельефов в ходе обработки, описания закономерностей влияния режимов обработки на свойства обработанной поверхности, отсутствием практических рекомендаций, касающихся процесса обработки. По этой причине, следует подробно рассмотреть, изучить и систематизировать имеющиеся на данный момент наработки в области ультразвукового пластического деформирования, а также провести ряд собственных

изысканий для формулирования выводов, касающихся способности УЗПД влиять на степень смачиваемости обработанных поверхностей, формулирования прикладных рекомендаций. Возможность применения полученных результатов является перспективной для сферы повышения надёжности узлов трения, поскольку вопрос обеспечения благоприятных условий смазывания деталей машин остаётся актуальным и на данный момент.

В связи с этим, **целью** работы является установление взаимосвязей режимов ультразвукового ППД поверхностей деталей, работающих на трение, с характеристиками смачиваемости обработанных поверхностей.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих **задач**:

- Выбор способа оценки степени смачиваемости поверхности на основе анализа существующих методик
- Выбор режимов УЗПД поверхностей экспериментальных образцов на основе моделирования процесса формирования микрорельефа и установление геометрических параметров микрорельефа в зависимости от условий обработки
- Разработка комплекса технических решений, обеспечивающих проведение экспериментов на имеющемся оборудовании
- Подготовка экспериментальных образцов и подбор смазочных материалов
- Описание зависимостей формирования топографии микрорельефа от режимных параметров УЗПД и взаимосвязей характеристиками смачиваемости поверхностей
- Разработка рекомендаций по назначению режимов УЗПД, обеспечивающих смачиваемость поверхности

Выводы по 1 главе

Проведенный литературный анализ показал, что ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование является перспективным способом финишной обработки ответственных поверхностей, работающих на трение. Помимо упрочняющего и чистового эффекта, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства изделий, обработка позволяет формировать на поверхности особый управляемый микро- и макрорельеф, варьирование параметров которого оказывает влияние на смачиваемость поверхности. В силу того, что поверхности, работающие в условиях жидкостного и полужидкостного трения, должны обладать свойством смачиваемости, необходимо изучить влияние режимов финишной обработки на способность обработанной поверхности удерживать смазку.

В имеющихся в доступе литературных источниках не представлены сведения о взаимосвязи режимов обработки ультразвуковым пластическим деформированием с характеристиками смачиваемости обработанных поверхностей.

В связи с вышесказанным, исследование влияния режимов УЗПД на характеристики смачиваемости обрабатываемых поверхностей является актуальным. Поскольку на смачиваемость поверхности влияет в большей степени состояние ее микрогеометрии и волнистости, в ходе исследования необходимо изучить взаимосвязи геометрических характеристик обработанной поверхности, полученных при заданных режимах обработки, а затем опосредованно связать режимы обработки с характеристиками смачиваемости. Оценка смачиваемости обработанных поверхностей будет производиться экспериментально. Методики проведения экспериментов описаны далее.

2 Методики, оборудование

2.1 Методы оценки смачиваемости поверхностей

На данный момент, контроль способности смачиваться поверхностями различной продукции широко применяется, как в сфере машиностроения, приборостроения, часового производства и науки, так и лёгкой промышленности.

Потребности в точном и быстром определении степени смачиваемости значительных объёмов покрывается большей частью путём автоматизированного оборудования. Класс данного оборудования носит название тензиометры.

Тензиометр является прибором, позволяющим определять поверхностное натяжение жидкостей и краевые углы смачивания. Определение поверхностного натяжения жидкостей тензиометром реализовано на основе трёх методов: метода отрыва кольца дью Нуи, метода пластины Вильгельми и метода поднятия по капилляру Вашбурна.

Кроме того, существуют и менее затратные методы исследования. Наиболее применяемой группой методов измерения краевых углов являются методы сидячей капли. Их применение основано на анализе фотографий высокого разрешения путем наложения на изображения линий для измерения краевых углов смачивания с использованием графических редакторов [7]. Помимо этого, существуют методы, позволяющие определить маслосмачиваемость поверхности по скорости растекания масляного пятна по исследуемой поверхности при нанесении дозированной капли и наложении прозрачной плёнки с делениями [25].

Оценка смачиваемости (олеофильности) обработанных при помощи УЗПД поверхностей, требует измерения динамических углов смачиваемости (натекания и оттекания). Определение их величины позволит дать качественную оценку смачиваемости поверхности.

Следует рассмотреть наиболее используемые методы определения углов смачивания.

2.1.1 Определение краевых углов методом пластины Вильгельми

Определение краевых углов чаще всего реализуется также на основе метода пластины Вильгельми, однако в двух вариациях: непосредственно метод погружения пластины и метод одиночного волокна (рисунок 10). Метод позволяет определять краевые углы до 90° . В случае метода пластины, краевой угол определяется в результате погружения образца в жидкость с известным поверхностным натяжением и выниманием его по факту смачивания. Изменение краевого угла определяют по значениям силы смачивания и выталкивания пластины. Метод является более точным, чем методы, подразумевающие оптическое наблюдение краевого угла. Метод одиночного волокна работает по схожему принципу, однако в отличие от метода пластины имеет немаловажный недостаток – волокно способно вносить неточность в результат. Волокно при смачивании может участвовать в процессе, в качестве полого капилляра, что приведёт к неточности измерения вследствие влияния капиллярных сил [5, 26].

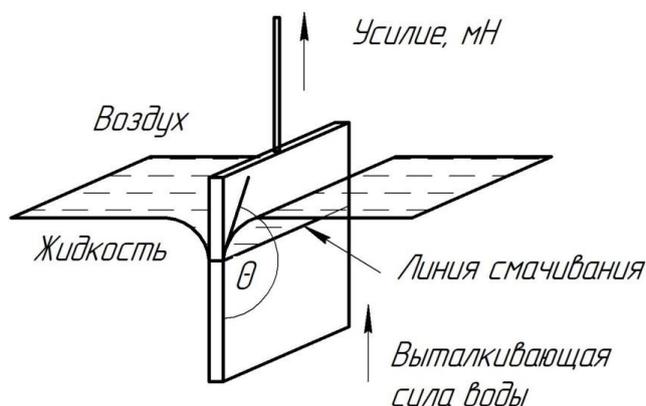


Рисунок 10 - Метод пластины Вильгельми.

Измерения, получаемые данным методом, отличаются высокой точностью, но требуют наличия соответствующего оборудования.

В отсутствие вышеописанного оборудования, наиболее рациональными является определение степени смачиваемости посредством метода сидячей капли и его вариаций.

2.1.2 Методы сидячей капли и его вариации

Метод сидячей капли основан на анализе фотографий высокого разрешения путём наложения на изображения линий для измерения краевых углов смачивания с использованием графических редакторов. Суть метода заключается в измерении угла между подложкой и касательной к образующей кривой капли на границе раздела трёх фаз [5].

Существует несколько вариаций метода сидячей капли: метод сидячей капли на горизонтальной поверхности, метод сидячей капли на наклонной поверхности, метод сидячей капли на вертикальной поверхности. Каждая из вариаций нуждается в отдельном рассмотрении.

Метод покоящейся капли

Метод лежачей капли относится к статическим методам определения поверхностного натяжения, то есть поверхность капли неподвижна в момент измерения. В основе метода – измерения профиля капли, лежащей на исследуемой поверхности. Профиль анализируют в ходе обработке на графическом редакторе сделанной фотографии капли.

Измерение краевых углов происходит в следующем порядке: на очищенную поверхность капилляром наносится капля жидкости. Каплю освещают источником света и фиксируют посредством фотокамеры (рисунок 11). В ходе обработки полученное изображение увеличивают до необходимых размеров и по профилю, посредством геометрических

построений в графическом редакторе определяют необходимые для измерения параметры профиля капли (рисунок 12).

Метод отличается простотой требований к техническому оснащению и не требует знания поверхностного натяжения жидкости, однако трудно применим в случае испытания поверхностей с хорошей смачиваемостью (краевые углы менее $60^\circ - 45^\circ$). Для получения адекватных результатов измерений олеофильных поверхностей, необходимо вносить поправку в результат измерения на коэффициент шероховатости поверхности, рассчитывающийся по формуле [27]:

$$k = R_{a \text{ шер}} / R_{a \text{ полир}}, \text{ где}$$

$R_{a \text{ шер}}$, $R_{a \text{ полир}}$ – высотный показатель микрогеометрии поверхности образца и полированной поверхности соответственно.

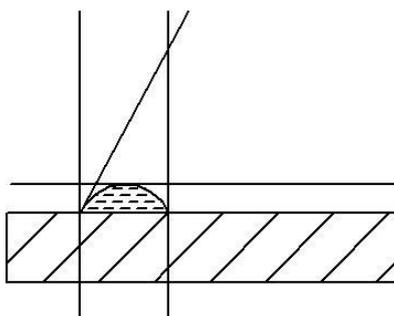


Рисунок 11 - Изображение обработанное в графическом редакторе.

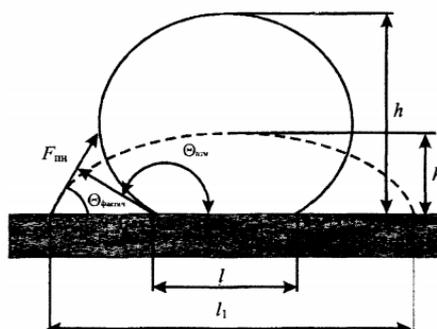


Рисунок 12- Геометрические параметры, используемые в расчётах.

Для вычисления поправочного коэффициента необходимо определить посредством профилометра - профилографа шероховатость образца.

Определение краевого угла производится по формуле [27]:

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{lhk^2}{(l/2)^2k^4+h^2} \cdot \text{где}$$

l – длина хорды капли; h – высота капли; k – коэффициент шероховатости

Также, получение значений краевого угла возможно прямым измерением с последующим домножением результата на коэффициент шероховатости [27].

Метод сидячей капли на горизонтальной поверхности является классическим статическим методом измерения угла смачивания. Одним из способов реализации метода является метод нанесения сидячей капли через капилляр (Needle-embedded Sessile Drop Method). Помещённую на исследуемую поверхность каплю жидкости, объёмом 0,001 – 0,002 мл постепенно увеличивают в объёме со скоростью, не превышающей 0,0002 мл/с, путём вливания порций жидкости через введённую в каплю иглу – капилляр. В течение эксперимента каплю увеличивают до объёма 0,2 мл. Результатом манипуляций является продвижение периметра смачивания и изменение краевого угла натекания. Изменения угла смачивания фиксируются и обрабатываются. Измерение угла оттекания производится забором жидкости из капли в соответствии с теми же рекомендациями (рисунок 13). Раскадровка процесса измерения краевых углов на горизонтальной поверхности представлена на рисунке 14.

Метод требует наличия капилляров малых диаметров (микроиглы) и дозаторов, способных подавать порции жидкости с чётко заданной скоростью. Также требуется обеспечение осесимметричного расширения капли для обеспечения точности измерения. Это требует точного расположения капилляра в капле или создания стенда с подачей жидкости через отверстие в исследуемой поверхности. Кроме этого, малый диаметр капилляра способствует высокой степени его адгезии с жидкостью, что возможно исправить увеличением диаметра иглы. Однако, увеличивая диаметр капилляра, неизбежно возникают деформации капли, что негативно

влияет на точность измерения. Решением данной проблемы является нанесение фторопластового покрытия на иглу [28].

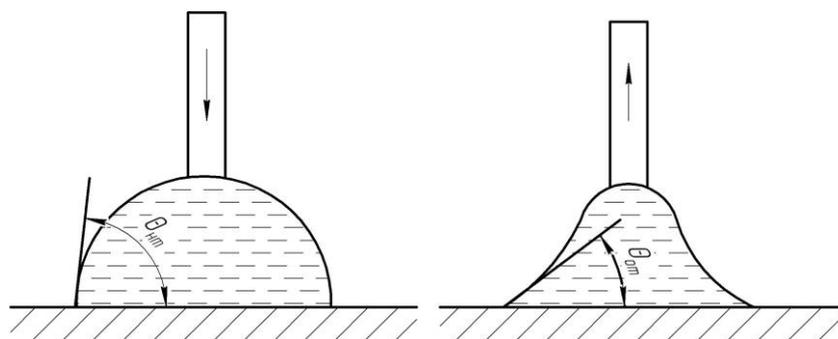


Рисунок 13 - Углы натекания и оттекания, измеряемые методом нанесения сидячей капли через капилляр.

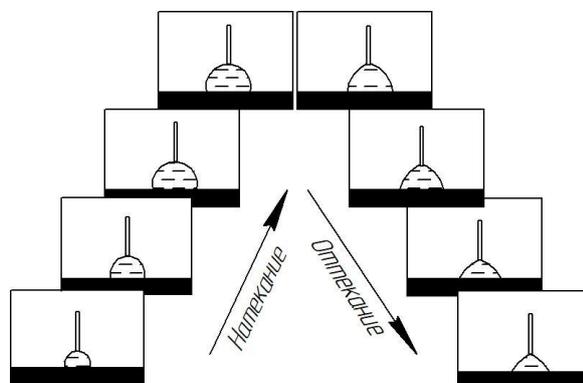


Рисунок 14 - Порядок проведения эксперимента методом нанесения сидячей капли через капилляр.

Метод сидячей капли на наклонной поверхности позволяет измерять динамические углы смачивания (натекания и оттекания) благодаря использованию наклонной скамьи. Капля помещается на пластину, наклоном которой помещённую на поверхность сидячую каплю выводят из состояния равновесия, приводя её в движение (рисунок 15). Метод позволяет измерить динамические углы смачивания. Однако, существуют некоторые ограничения, осложняющие применение метода [28].

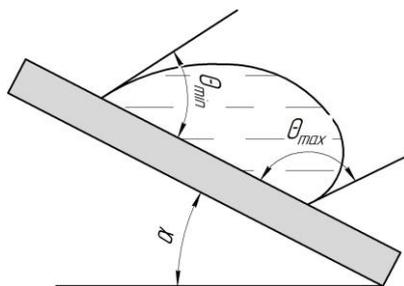


Рисунок 15 - Метод сидячей капли на наклонной поверхности.

Указанные углы θ_{\min} и θ_{\max} не в полной мере тождественны углам оттекания и натекания ($\theta_{\text{от}}$ и $\theta_{\text{нт}}$, соответственно). Причиной тому является влияние угла наклона пластины α , увеличение которого ведёт к повышению адгезивности поверхности. Увеличение степени межфазного взаимодействия ведёт к уменьшению поверхностного натяжения и повышению степени смачиваемости, что значительно влияет на точность измерений.

Исходя из результатов работ [28 – 30] можно судить о том, что для гидрофильных поверхностей значение углов $\theta_{\max} = \theta_{\text{нт}}$, однако значения θ_{\min} и $\theta_{\text{от}}$ достаточно сильно различаются, вследствие искажения капли в процессе стекания. При рекомендуемом угле наклона пластины не более 30° , метод позволяет определить угол натекания с погрешностью менее 2%, погрешность измерения $\theta_{\text{от}}$ варьируется от 1,5%, при малом объёме капли и малой величине шероховатости до 600%, при применении капли большого объёма и значительных величинах шероховатости. Таким образом, метод применим ограничено [28 – 30].

Метод сидячей капли на вертикальной поверхности

Метод сидячей капли на вертикальной поверхности (рисунок 16) позволяет определить значения динамических краевых углов без влияния факторов, вносящих неточности в результаты эксперимента. Эксперимент проводится на стенде, на котором испытываемый образец помещён вертикально. Для облегчения фиксации результатов эксперимента обеспечивается контрастный фон за стендом. На образец порционно через иглу шприца наносятся капли,

впоследствии стекающие с поверхности образца. Фиксация «рабочей зоны» осуществляется на камеру с функцией макросъёмки. Метод требует создания несложного стенда и применения фиксирующей техники, и при этом является достаточно точным, в рамках проводимых экспериментов.

Метод сидячей капли на вертикальной поверхности является вариацией метода сидячей капли на вертикальной нити, описанной в работах [31, 32]. Общие принципы применения этих методов идентичны. Дозированная капля помещается на вертикальную поверхность или нить и под собственным весом отклоняется от точки равновесия. Наблюдение за каплей заканчивается в момент обретения ею метастабильного состояния, вследствие потери части объёма и уменьшения массы капли (рисунок 16).

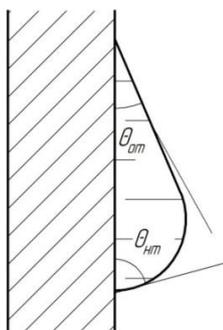


Рисунок 16 – Метод сидячей капли на вертикальной поверхности.

Метод прост в применении, не требует применения сложной аппаратуры и позволяет производить испытания в кратчайшие сроки. Точность измерений достаточна для технических расчётов при применении стандартных средств фото фиксации, но имеет перспективы к повышению с применением специальных объективов с нанесённой шкалой.

2.1.3 Метод прижатой капли

Характер смачиваемости при применении метода прижатой капли оценивается толщиной масляной плёнки, полученной путём раскатки по поверхности образца дозированной капли масла валиком. Посредством этого

метода возможно измерить непосредственно краевые углы натекания и оттекания, однако точность их замера невысока, вследствие зависимости величины краевого угла от силы прижатия валика к поверхности. Кроме того, способ не даёт представления о способности масляной плёнки к самовосстановлению [31]. Вследствие невысокой точности дальнейшее рассмотрение не целесообразно.

2.1.4 Метод прикрепления пузырька

Достоинством метода прикреплённого пузырька по сравнению с методом покоящейся капли является полная гидратация исследуемой поверхности. Таким образом, можно ожидать, что поверхностная энергия между жидкостью и исследуемой поверхностью не будет изменяться в ходе измерения геометрических параметров пузырька воздуха, на границе раздела поверхность-жидкость. При использовании данной методики применяется схема установки, изображённая на рисунке 17. Измерения краевых углов осуществляется в трехфазной системе, состоящей из жидкости, твёрдой поверхности и пузырька воздуха или октана.

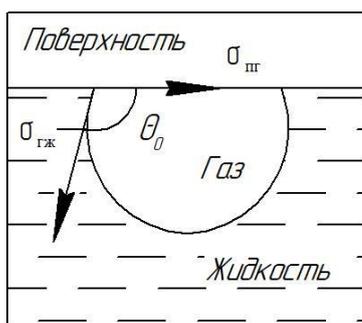


Рисунок 17 - Метод прикрепления пузырька.

Для определения краевого угла смачивания θ а также, как и в методе покоящейся капли, необходимо измерить высоту капли, h , и диаметр основания капли, d , прикреплённой к поверхности исследуемого образца.

Специально изготовленной изогнутой иглой на исследуемую поверхность, погружённую в жидкость наносится пузырёк воздуха объёмом $0,01 \text{ см}^3$, после чего иглу удаляют. Геометрические параметры пузырька фиксируют через 1, 3, 5, 20 минут с момента прикрепления пузырька. Полученное цифровое изображение обрабатывают с помощью графического редактора и определяют искомый угол смачивания.

Измерения проводят для 10-20 пузырьков воздуха. Усредненный краевой угол смачивания рассчитывают, с использованием метода регрессионного анализа обработки экспериментальных данных [28, 29].

Метод не требует внесения поправок в результаты измерения и отличается достаточной для инженерных расчётов точностью. Его недостатком является высокая трудоёмкость и значительные временные затраты на проведение как единичного эксперимента, так и серии.

2.1.5 Метод определения степени смачиваемости по скорости растекания масляного пятна

Метод определения маслоёмкости по скорости растекания масла (рисунок 18) позволяет качественно определить способность смачиваться и удерживать масло. По скорости растекания, определённой в ходе замера времени растекания и площади масляного пятна возможно сделать выводы о степени и качестве изменения смачиваемости через изменение коэффициента трения, выявленное при сравнении исследуемых образцов, подвергнутых обработке с разными режимами; при сличении с эталоном. Метод прост в применении и не требует специального оборудования. В качестве шкалы, по которой определяется степень растекания пятна, используется прозрачная плёнка с нанесёнными штрихами, концентрически отложенными от центра отверстия, через которое осуществляется нанесение капли масла [25].

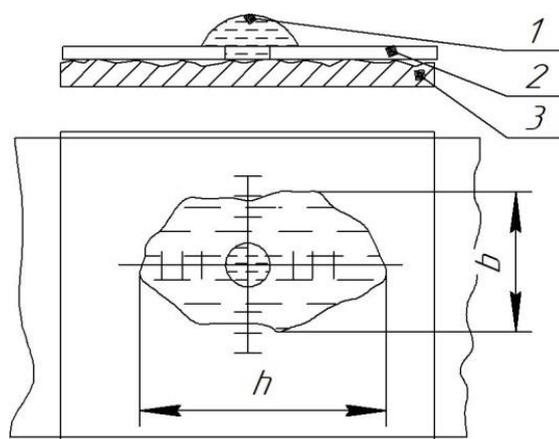


Рисунок 18 – Метод определения смачиваемости по скорости растекания.

1 – капля масла; 2 – плёнка; 3 – образец.

На основе приведённой ранее информации можно прийти к выводу о наличии широкого перечня способов определения степени смачиваемости, используемых в зависимости от решаемых задач и оснащённости технической базы.

Цель работы диктует к методам, применяемым в решении задач следующие критерии:

- Точность, достаточная для инженерных целей
- Простота и производительность применения
- Экономичность методов
- Простота технической базы

Наиболее полно из представленных методов удовлетворяют критериям методы определения смачиваемости по скорости растекания и метод сидячей капли на вертикальной поверхности. Первый из перечисленных методов необходим для предварительной качественной производственной оценки степени смачиваемости обработанных образцов; второй предназначен для полноценной количественной оценки смачиваемости изучаемых поверхностей.

2.2 Оборудование, применяемое для осуществления УЗПД, его параметры

Для проведения экспериментальных исследований необходимо использовать оборудование для ультразвукового пластического деформирования, состоящее из генератора ультразвуковых колебаний и преобразователя электрических колебаний в механические, устанавливаемых на станок. За один удар инструмента обработке подвергается небольшой участок поверхности, поэтому необходимо обеспечить перемещение инструмента вдоль обрабатываемой поверхности.

Для обработки цилиндрических поверхностей инструменту необходимо сообщать перемещение вдоль оси детали при сохранении возможности прижима детали к поверхности с заданным статическим усилием. Для обработки торцовых поверхностей необходимо обеспечить перемещение детали в направлении, перпендикулярном оси детали, также с сохранением возможности поджатия инструмента к обрабатываемой поверхности.

Установка для проведения экспериментальных исследований создана на базе токарно-винторезного станка ИЖ – 250 (таблица 1) и предназначена для обработки методом ультразвукового пластического деформирования цилиндрических и торцовых поверхностей. Перемещение инструмента относительно детали в процессе обработки обеспечивается продольным и поперечным суппортами станка.

Таблица 1 – Параметры ИЖ – 250 (250ИТВМ.01)

Количество ступеней прямого вращения шпинделя, об/мин	21
Частота прямого вращения шпинделя, об/мин	25..2500
Перечень доступных частот вращения, об/мин	25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500
Цена деления лимба продольного перемещения суппорта, мм	0,1
Пределы рабочих подач продольных, мм/об	0,01..1,8
Перечень доступных продольных подач, мм/об	0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1; 1,5; 1,8

Прижим деформирующего инструмента осуществляется посредством груза определённой массы, воздействующего на подвижную часть приспособления с закрепленным на нее инструментом через систему блоков.

Схема установки представлена на рисунке 19. Она содержит: приспособление для закрепления инструмента на станке, магнитоотриктор (поз. 1), концентратор (поз. 2) и деформирующий инструмент - индентор (поз. 3). Основание приспособления (поз. 4) закрепляется на суппорте станка болтами, для чего в суппорте были предварительно выполнены резьбовые отверстия. Для обеспечения постоянства статического усилия выбрана упругая схема поджатия инструмента к детали (поз. 9) посредством шариковых направляющих (поз. 5) и груза соответствующей массы (поз. 6), подвешенного через систему блоков (поз. 7).

Важным условием обработки является требование по взаимному расположению оси инструмента относительно обрабатываемой детали. Для создания нормального усилия воздействия инструмента на деталь, осям инструмента и детали необходимо обеспечить такое расположение, чтобы они находились на одном уровне.

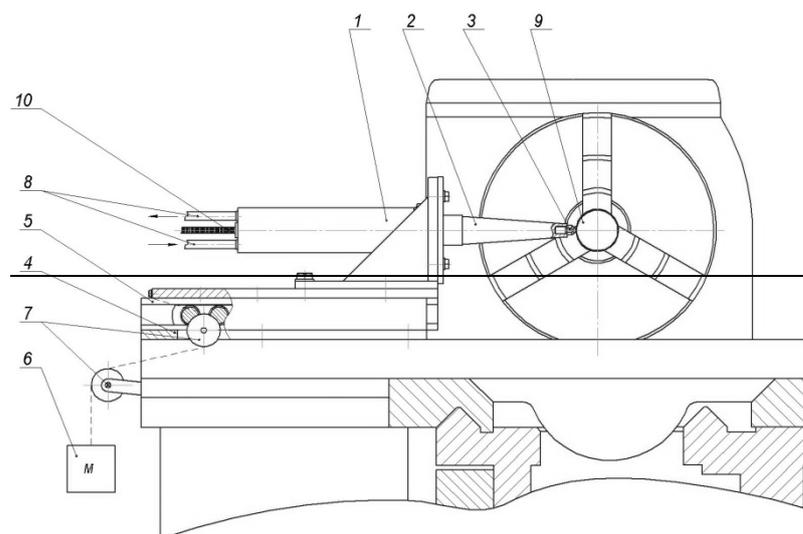


Рисунок 19 - Схема установки,

1 – магнитостриктор, 2 – концентратор, 3 – индентор, 4 – основание приспособления, 5 – шариковые направляющие, 6 – груз, 7 - система блоков, 8 – шланги для подачи воды, 9 – обрабатываемая деталь, 10 – кабель питания.

В процессе обработки деталь совершает вращательное движение. Инструмент перемещается за счёт обеспечения поступательного движения в радиальном направлении относительно детали (поперечная подача суппорта) при обработке торцовых поверхностей, либо за счёт поступательного движения вдоль оси детали (продольная подача суппорта). Колебательные движения инструмента с ультразвуковой частотой приводят к появлению отпечатков на поверхности детали, перекрытие которых обеспечивает обработку поверхности, имеющей площадь больше следа единичного отпечатка. При определённых условиях возможно получение как полностью, так и частично регулярного микрорельефа за счет изменения кинематических параметров обработки.

Для воспроизведения механических ультразвуковых колебаний используется прямой магнитострикционный эффект, проявляющийся в изменении линейных размеров тела, помещённого в переменное магнитное поле. В описываемой установке применяется ультразвуковой стержневой

магнитострикционный преобразователь фирмы «Ультразвуковая техника - Инлаб», технические характеристики которого представлены в таблице 2.

Во избежание перегрева магнитостриктора используется охлаждение. С этой целью в пакете магнитострикционного преобразователя предусмотрен подвод и отвод воды через штуцеры с помощью шлангов (рисунок 19 поз. 8). При этом штуцер входа располагается ниже штуцера выхода, для обеспечения выхода воздуха из корпуса магнитострикционного преобразователя без образования воздушных пробок. Давление воды в линии должно быть в пределах 0,3-2 кг/см³. Температура воды не должна превышать 60°.

Таблица 2 - Технические характеристики магнитострикционного преобразователя

Присоединительная мощность, не более, кВт	1
Рабочая частота, кГц	22± 10%
Температура охлаждающей жидкости, не более, °С	60
Давление охлаждающей жидкости в линии, кг/см ³	0,3-2

Переменный ток с необходимой частотой обеспечивается ультразвуковым генератором ИЛ 10-0.1 того же производителя, предназначенным для питания ультразвукового магнитострикционного преобразователя. Питание магнитострикционного преобразователя осуществляется через кабель питания (рисунок 19, поз.10). Технические характеристики генератора представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Технические характеристики ультразвукового генератора ИЛ10-0.1

Входная мощность, Вт	1200
Выходная мощность, Вт	1000
Ступенчатая регулировка мощности, % от номинальной	100%, 75% и 50%
Рабочая частота, кГц	22 ± 10%
Тип преобразователя	магнитострикционный

Проведённые предварительные эксперименты показали, что работа с коническим концентратором сопряжена с определёнными трудностями – при

мощностях генератора 75% и 100% высока вероятность разрушения инструмента, а при мощности 50% работа генератора нестабильна, что приводит к выходу системы из резонансного режима.

Применение цилиндрического концентратора позволит обрабатывать детали с большей мощностью генератора за счёт изменения коэффициента усиления (K_y) до 1. При этом амплитуда на выходе концентратора составит от 50% до 100% от амплитуды на входе концентратора за счёт переключения регулятора мощности генератора ультразвуковых колебаний. Расчёт параметров цилиндрического концентратора сводится к определению его длины, которая должна быть кратна половине длины волны ультразвуковых колебаний, передаваемых в материале, из которого он выполнен. Коэффициент усиления ультразвуковых колебаний у цилиндрического концентратора равен отношению диаметра наибольшей ступени к диаметру наименьшей ступени. Поскольку у данного концентратора нет перепадов диаметров, коэффициент усиления равен единице.

Амплитуды колебаний при измерении на работающей установке с цилиндрическим концентратором без нагрузки при разных режимах мощности работы генератора ультразвуковых колебаний представлены в табл. 4.

Таблица 4 - Значения амплитуды колебаний при работе установки с цилиндрическим концентратором на разных режимах мощности.

Режим мощности, %	Измеренное значение амплитуды, мкм
100% (1 кВт)	30
75% (750 Вт)	25
50% (500 Вт)	20

Как было отмечено выше, для осуществления УЗПД по осевой схеме, необходимо обеспечить пересечение продольных осей инструмента и заготовки. Это достижимо путём заложения в конструкцию при проектировании базового кронштейна, возможности регулирования высоты

расположения ультразвуковой головки. Возможность регулировки облегчает модернизацию станка и позволяет в кратчайшие сроки произвести перенос установки на станок с отличной высотой центра. Исходный базовый кронштейн предназначался для оснащения станка с высотой центров 165 мм. Решаемой задачей является перенос приспособления на станок с высотой центров 150 мм.

Для реализации технического решения произведены следующие изменения конструкции исходного базового кронштейна (рисунок 20): опорная стенка кронштейна выполнена в виде портала, что позволяет без ограничений перемещать ультразвуковую головку в вертикальном положении. В вертикальной опорной стенке сделаны отверстия, предназначенные для крепления опорного фланца. Опорный фланец (рисунок 21), к которому крепится ультразвуковая головка служит промежуточным звеном, позволяющим менять высоту расположения ультразвуковой головки. Регулировка положения возможна благодаря выполненным в опорном фланце крепёжным пазам. Для перемещения головки в крайнее нижнее положение предусмотрен паз для размещения корпуса головки. Расположение ультразвуковой головки в крайнем нижнем положении требует наличия выборки в плите кронштейна, поскольку уширение корпуса ультразвуковой головки, расположенное у концентратора препятствует перемещению, упираясь в горизонтальную плиту кронштейна. Фланец ультразвуковой головки при её размещении в крайнем нижнем положении упирается в плиту подвижных направляющих. Для устранения этой проблемы крепёжные отверстия, посредством которых производится крепление кронштейна, выполнены в виде пазов. Перемещение кронштейна относительно края плиты направляющих предоставляет свободное размещение фланца. Ширина пазов, исходя из ГОСТ 16030 - 70 [33] составляет $1,1d$, где d – диаметр стержней крепёжных деталей. Оси пазов для крепления опорного фланца, относительно ребра жёсткости кронштейна, в

соответствии с техническими рекомендациями расположены на расстоянии $1,25 d$ для обеспечения доступа накладной головки торцевого ключа к гайке [34, 35]. Протяжённость пазов соответствует значениям ряда ГОСТ 16030 – 70 (10 мм).

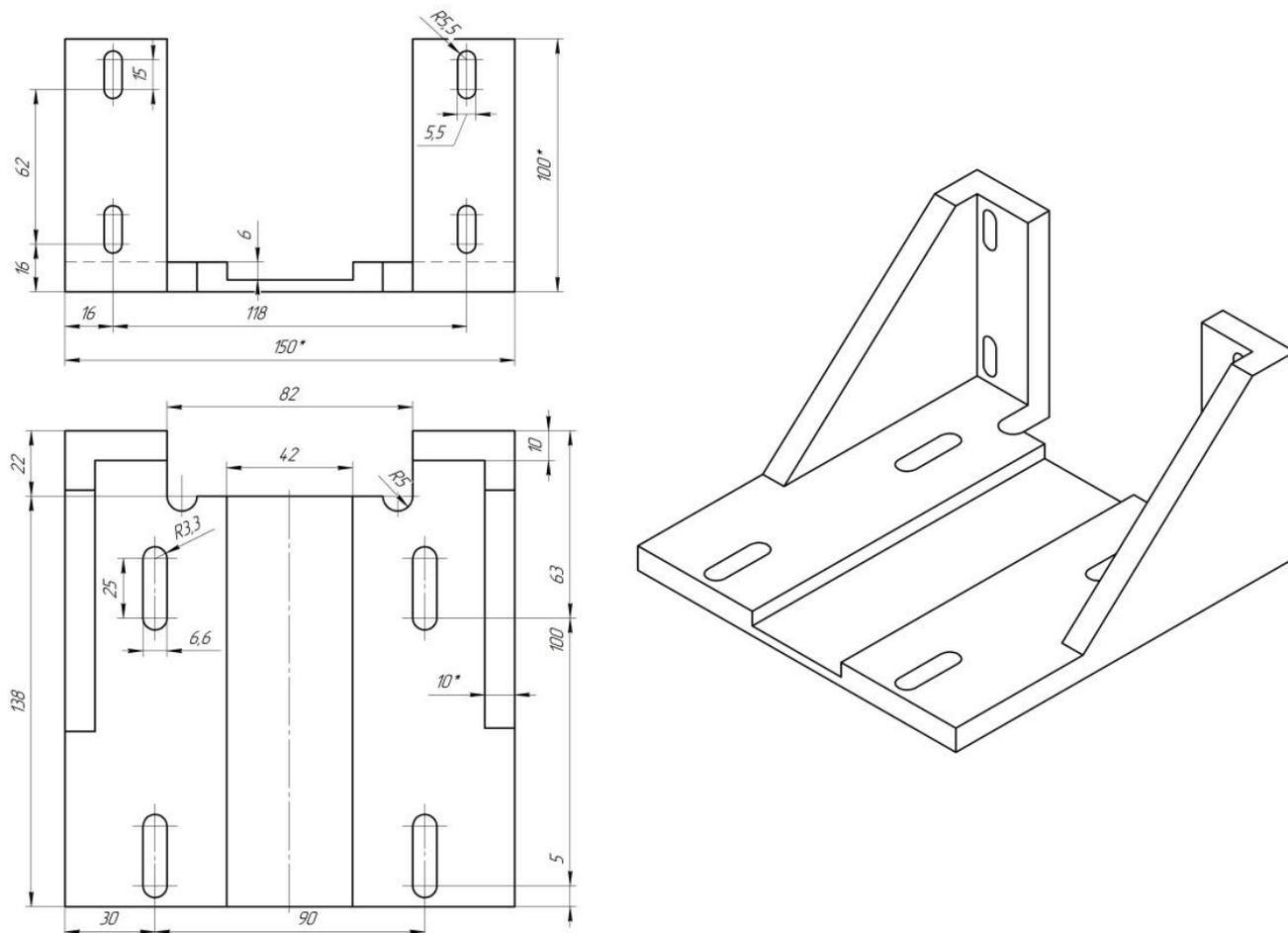


Рисунок 20 – Кронштейн приспособления.

В ходе работы над приспособлением была увеличена его универсальность. Деление приспособления для крепления ультразвуковой головки на кронштейн и опорный фланец добавляет возможность регулировать высоту расположения оси обрабатываемой части установки относительно плоских направляющих станины. Тем самым, облегчается процедура переноса установки на станки с различными высотами центров. Протяжённость пазов в вертикальной опорной стенке кронштейна позволяет регулировать положение оси ультразвуковой головки в диапазоне от 150 мм

создание остаточных сжимающих напряжений, создание регулярного или периодически регулярного микрорельефа, представляющего из себя сеть взаимно перекрывающихся единичных отпечатков определённого объёма и создание кратно величине подачи повторяющихся волн пластического течения (макрорельеф). Образование микро – и макроструктур на обработанной поверхности является значимым фактором в процессе смачивания и может кардинально влиять на способность смачиваться.

Для целенаправленного моделирования процесса обработки и, тем самым определения рациональных в рамках эксперимента режимов, необходимо рассмотреть параметры новообразованного микро – и макрорельефов.

К параметрам формируемого микрорельефа можно отнести:

- Диаметр пластического отпечатка $d_{пл}$
- Расстояние между соседними отпечатками в направлении линейной скорости детали l_v
- Расстояние между соседними отпечатками в направлении подачи l_s
- Глубина фрагмента $h_{фр}$

Диаметр пластического отпечатка является показателем остаточной пластической деформации обработанного материала. Величина диаметра говорит о внедряемости индентора в обрабатываемую поверхность, что, в свою очередь даёт представление о объёме сформированного отпечатка. Задание при обработке различных соотношений l_v и l_s позволяет управлять равновесностью и регулярностью микрорельефа. Тем самым, варьируя параметры линейной скорости вращения и подачи, возможно формировать различные по конфигурации микрорельефы, состоящие из пластических отпечатков различной степени равновесности, вытянутости или искажённости.

Соотношение l_v и l_s позволяющие получить равновесный микрорельеф с формой пластических отпечатков правильной шестиугольной формы описывается следующим образом [22]:

$$\frac{l_v^2}{l_s^2} = \frac{4}{3}, \text{ где}$$

$$l_v = \frac{\pi d n}{6 \cdot 10^4 \cdot f}$$

Представленные выше параметры имеют зависимость от линейной скорости вращения заготовки.

Глубина фрагмента $h_{фр}$ формируется при взаимном перекрытии отпечатков, имеющими диаметр $d_{отп}$, образующихся при УЗПД. Образование нового микрорельефа без следов предшествовавшей обработки возможно только при полном перекрытии единичных отпечатков всей поверхности. При этом глубина внедрения должна быть такой, чтобы следы предшествующей обработки деформировались и не оставляли следов на обработанной поверхности.

Для описания макрорельефа целесообразно использовать следующие параметры:

- высота волн
- угол наклона волн α
- шаг между соседними волнами s

Некоторые из режимов обработки при УЗПД в условиях данной работы являются постоянными при обработке всех образцов. Такими параметрами являются частота колебания инструмента f и статическое усилие $F_{ст}$. По этой причине, зависящие от этих режимов параметры, такие как угол наклона волн α и высота волн будут оставаться неизменными (угол наклона волн) или изменяться умеренно (высота волн). Мерой воздействия на высоту волн является увеличение подачи инструмента в пределах допустимых значений, что позволяет снизить высоту вершин волн.

Условием образования такого макрорельефа как волны течения является перекрытие отпечатков в направлении линейной скорости. В общем случае, формирование волнистости зависит от выбранных линейной скорости вращения и подачи или же от соотношения l_v к l_s . Описывает условия начала образования волнистости следующая система неравенств [24]:

$$\begin{cases} v \leq \frac{d_{пл}}{2 \cdot 60f} \\ s \leq \frac{d_{пл}}{10} \end{cases}$$

Благодаря приведённой выше системе неравенств, имеется возможность управлять процессом возникновения волнистости на обрабатываемых образцах.

Возникновение угла наклона волн α при обработке возникает как следствие наличия дробной части удара инструмента в течение одного оборота заготовки, и как следствие, не целое число витков волн в один оборот [36]. Кроме этого, частота колебания инструмента способна значительно изменить угол наклона волн, а именно нестабильность частоты колебания инструмента при постоянных линейной скорости вращения и подаче.

2.3.2 Выбор режимных параметров обработки для проведения экспериментальных исследований

Диапазон режимов обработки УЗПД ограничивается следующими параметрами: статическое усилие $F_{ст} = 50...250$ Н; окружная скорость вращения заготовки $V = 50...250$ м/мин; частота ударного воздействия $f = 22$ кГц; амплитуда колебания наконечника инструмента $2A=22$ мкм; продольная подача $s = 0,01 - 0,2$ мм/об; диаметр деформирующего элемента $d = 8$ мм. Ограничения связаны с возможностями оборудования (значения A ,

f) и ограничениями, с точки зрения процесса образования микрорельефа (V , S , $F_{ст}$). Ниже приведены обоснования ограничений параметров.

Нижний предел статического усилия $F_{ст}$, H ограничен чувствительностью системы. При приложении меньших нагрузок не гарантирован возврат инструмента в исходную точку после единичного колебания, вследствие недостаточного обеспечения силового замыкания инструмента и обрабатываемой поверхности. Кроме этого, вследствие ограниченных возможностей применяемого оборудования в плане реализации широкого диапазона значений подач, не представляется возможным применять чрезмерно малые значения статического усилия, поскольку это приведёт к неполному перекрытию единичных отпечатков за счёт уменьшения их глубины и диаметра. В общем же случае перекрытия можно добиться варьированием скорости вращения детали и величины подачи.

Значения амплитуды ограничены из следующих технических соображений: ультразвуковой генератор, применяемый в данном случае, способен работать при режимах мощности 50%, 75%, 100%. Работая при максимальной нагрузке, генератор создаёт экстремальные условия работы деформирующего элемента, ведущие к его разрушению. Кроме этого, значительно ограничивает величину амплитуды параметры концентратора (трансформатора скорости). Увеличение максимального значения амплитуды требует проектирования и изготовления концентратора с необходимым коэффициентом усиления, что предполагает серьёзные затраты. Работа генератора при минимальных значениях не позволяет осуществлять обработку со стабильными режимами.

Максимальные значения продольной подачи S ограничены с целью предотвратить неполное перекрытие единичных отпечатков; минимальные значения ограничены особенностью обработки незакалённой стали. При формировании единичного отпечатка некоторая часть металла вытесняется к

границам следа удара инструмента. В работе [37] показано, что при малых значениях подачи возникает рост напльва, сформированного вытесненным металлом. Это приводит к накоплению материала, сдвигаемого инструментом, и, как следствие, возникновению волнистости на обрабатываемой поверхности. Таким образом, минимальное значение подачи не должно превышать критического значения, зависящего от диаметра единичного отпечатка.

Для выбора режимов обработки при проведении эксперимента была использована существующая модель ультразвукового пластического деформирования [37]. Проведение первого этапа моделирования направлено на определение диапазона величин диаметра фрагмента $d_{фр}$ и высоты развиваемой обработкой шероховатости R_a , при варьировании статического усилия $F_{ст}$ в допустимых пределах. Целью проведения первого этапа является определение рациональной величины статического усилия, позволяющей получать фрагменты микрорельефа достаточной величины для взаимного перекрытия при доступных оборудованию величинах подачи и частотах вращения обрабатываемого образца. Согласно работе [38], образование регулярного микрорельефа возможно при соблюдении условий обеспечения коэффициента перекрытия отпечатков в диапазоне $0,1 \dots 0,3$. Не менее важным является обеспечение глубины отпечатков, полученных УЗПД, превышающих значение исходной шероховатости R_a 2 мкм. Моделирование процесса образования фрагмента микрорельефа произведётся посредством программы UZOlab (рисунок 23, 24), разработанной силами НГТУ. Условия моделирования диктуются вышеперечисленными требованиями к получаемому микрорельефу. Моделирование производилась делением диапазона значений статических усилий на 5 интервалов. Результаты моделирования приведены в таблице.

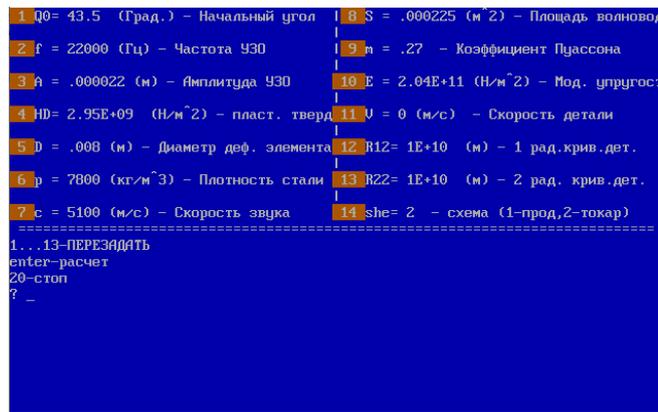


Рисунок 23 – Интерфейс программы UZOlab.

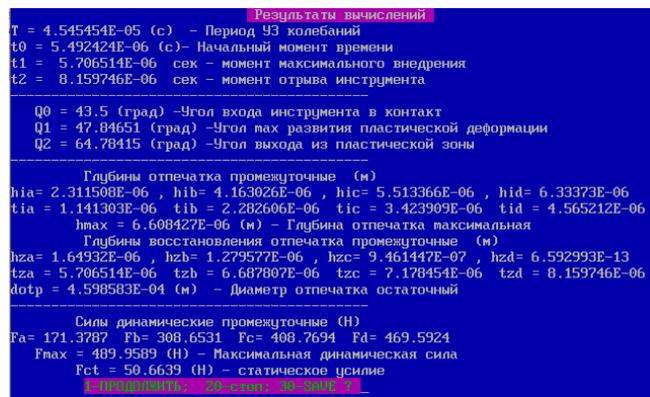


Рисунок 24 – Результаты расчётов параметров отпечатков в программе UZOlab.

Таблица 5 – Результаты моделирования

№	Статическое усилие ($F_{ст}$), Н	Диаметр отпечатка ($d_{от}$), мкм	Максимальная глубина отпечатка h_{max} , мкм	Величины упругой деформации $h_{упр} = h_{за}$, мкм	Глубина внедрения деформатора h , мкм
1	250	781	19	3,46	15,54
2	200	688	14,8	2,91	11,89
3	150	661	13,6	2,75	10,85
4	100	577	10,4	2,27	8,13
5	50	459	6,6	1,6	5

Исходя из результатов моделирования, образование микрорельефа с полным перекрытием следов предшествовавшей обработки могут обеспечить значения статического усилия в диапазоне 100...250 Н. Для проведения дальнейшего моделирования необходимо выбрать наиболее рациональное значение статического усилия, среди подходящих. При обработке

необходимо обеспечить наименьшую нагрузку на обрабатываемый образец, при этом получить диаметр фрагмента, позволяющий произвести обработку с применением наибольшего числа вариаций режимов с сохранением полного перекрытия отпечатков. Выбор статического усилия произведён из следующих соображений: Применение максимальных статических усилий может негативно сказаться на волнообразовании в процессе УЗПД из – за ограниченной жёсткости системы СПИД. Применение усилия 200 Н даёт наименьший прирост параметров отпечатка. Применение наименьшего статического усилия из диапазона ограничено риском нарушения силового замыкания. Использование $F_{ст} = 100$ Н, не рационально по причине относительно малых величин параметров получаемого отпечатка. Таким образом, наиболее рационально применение статического усилия 150 Н.

Следующим этапом моделирования является расчёт параметров получаемых единичных фрагментов варьированием линейной скорости вращения и продольной подачи инструмента. Задачей моделирования является выявления наиболее рациональных вариантов сочетаний режимов обработки.

Количественно величины l_v , l_s рассчитываются с использованием модели формирования регулярного микрорельефа [39]. Линейные размеры фрагментов определяются по формуле:

$$l_v = \frac{\sqrt{(\pi \cdot D)^2 + S^2}}{M + m}$$

где D- диаметр обрабатываемой детали, мм; S - расстояние между центрами соседних отпечатков в направлении подачи (равно подаче), мм; (M+m) – число отпечатков индентора, образующихся за один полный оборот детали.

Глубина фрагмента устанавливается путем математических вычислений, описывающих перекрытие отпечатков индентора при заданной кинематике, подробно рассмотренных в работе [40]. Расчёты велись с использованием программы MathCad.

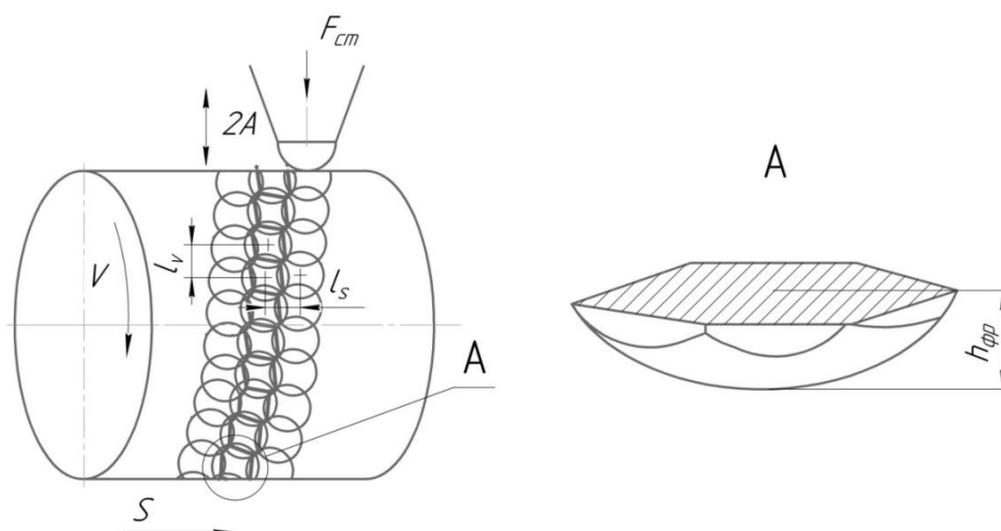


Рисунок 25 – Схема перекрытия единичных отпечатков.

Диапазоны режимов требуется разбить на интервалы для упрощения подготовки образцов (таблица 6).

Таблица 6– Частота вращения и окружная скорость обработки

№	Частота вращения n , мин ⁻¹	Окружная скорость V , м/мин (при $d = 0,045$ м)	Продольные подачи S , мм/об
1	630	89,06	0,05; 0,06; 0,075; 0,1; 1,5
2	800	113,1	
3	1000	141,37	
4	1250	176,71	
5	1600	226,19	

Ниже приведены результаты моделирования величин l_s , l_v (таблица 7)

Таблица 7 – Значения l_v

Диаметр детали d , мм	Частота вращения n , мин ⁻¹	V , м/мин	l_v , мкм
0,045 м	630	89,06	74,9
	800	113,1	95,15
	1000	141,37	118,9
	1250	176,71	133,8
	1600	226,19	171,2

Среди полученных значений сочетание скорости $V = 226,16$ м/мин и подачи $S = 0,15$ мм/об дало наиболее симметричный регулярный микрорельеф. При сочетании этих параметров значение выполняется требование, описываемое равенством ниже:

$$\frac{l_v^2}{l_s^2} = \frac{4}{3} = 1,3$$

Также, существует сочетание, позволяющее получить микрорельеф, близкий к симметричному. Его получение, судя по результатам моделирования, достижимо при сочетании $V = 141,01$ м/мин и подачи $S = 0,1$ мм/об. При этом, выражение равенство примет вид $l_v^2/l_s^2 = 1,4$. Прочие сочетания дают решения равенства $l_v^2/l_s^2 = 1,6...11$. Микрорельефы с коэффициентами, значительно большими, таковые у симметричных и близких к симметричным, отличаются значительными искажениями единичных отпечатков и микрорельефа в целом.

Для проведения эксперимента следует использовать некоторые из этих сочетаний. Ниже в таблице 8 будут перечислены сочетания режимов, выбранных для проведения обработки.

Таблица 8– Используемые в обработке режимы

№	V, м/мин	S, мм/об	l_v^2/l_s^2
1	226	0,15	1,3
2	141,37	0.1	1,4
3	176	0,1	1,79
4	113,1	0,060	2,51
5	89,06	0,05	3,17

Выбор приведённых выше режимов осуществлялся из соображений рассмотрения последствий для смачиваемости поверхностей, образования как симметричных микрорельефов и близких к ним, так и различной степени искажённости.

2.4 Подготовка экспериментальной установки

Экспериментальная установка, применяемая в данном эксперименте должна удовлетворять требованиям удобства использования и простоты конструкции. В связи с этим установка должна иметь:

- фиксированный источник света для улучшения условий фиксации результатов;
- крепление для задания однозначного положения фиксирующего устройства;
- контрастный фон для простоты обработки полученных изображений

Таким образом, установка состоит из рабочего стола 1, на базе которого размещена установка, площадки 2, на которой располагается исследуемый образец 3, контрастного щита 4, создающего контрастный фон получаемых изображений, штатива 5, обеспечивающего однозначное положение, относительно площадки и исследуемого образца, фиксированного источника света 6, обеспечивающего достаточную для получения чётких бездефектных изображений освещённость. Для обеспечения точности и повторяемости положения образцов, относительно штатива с фиксирующим устройством, на площадке 2 нанесена специальная разметка. Ниже (рисунок 26) приведена схема подготовленной экспериментальной установки.

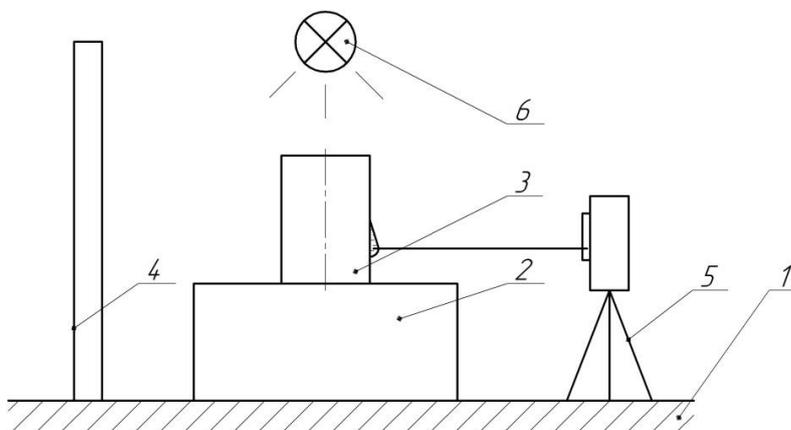


Рисунок 26 – Схема экспериментальной установки.

Фиксирующее устройство обладает возможностью производить серию снимков, функцию отложенной съёмки. Кроме того, с целью увеличения качества получаемых изображений, оснащено линзой для макросъёмки.

2.5 Выбор масла, применяемого для проведения экспериментов

Проведение экспериментов по оценке смачиваемости поверхностей преследует как теоретическую цель определения взаимосвязи технологических режимов УЗПД со свойствами, обеспеченными новообразованными микро – и макрорельефами, так и практическую подоплёку. Полученные результаты работы должны иметь практическую ценность. Для получения достоверных данных, эксперименты по оценке смачиваемости целесообразно проводить с применением смазочных материалов, используемых для смазывания узлов трения различной продукции машиностроения.

Частью подбора наиболее подходящего смазочного материала для осуществления экспериментов является изучение номенклатуры производимых для нужд машиностроения текучих масел.

Изучение масел применяемых в машиностроительных целях произведём в рамках следующих групп: моторные масла, масла для авиационных двигателей, трансмиссионные и гидравлические масла, индустриальные масла. Перед рассмотрением свойств и качеств смазочных материалов, следует выделить некоторые общие черты масел и предъявляемые к ним требования.

Для машинных масел характерна общая черта – в условиях гидродинамического трения смазывающая способность обеспечивается применяемым в основе базовым маслом. В точках контакта поверхностей деталей механизмов, часто наблюдается смещение условий смазывания в

сторону смешанных или граничных, что особенно часто наблюдается при пусках машин. Для облегчения условий смазывания в этих случаях выступают противоизносные и противозадирочные присадки в качестве которых наиболее часто используют серу – фосфор – бор – содержащие вещества.

В режиме граничного смазывания плёнка смазочного материала становится крайне тонкой, при этом в точках микроконтактов поверхностей деталей возникают высокие температуры. Температуры в этих точках могут превосходить температуру плавления металла. Противоизносные присадки при этом выступают в качестве модификаторов поверхностного слоя. Их задача заключается в создании плёнок так называемой эвтектических смесей на поверхностях трения. Плёнки обладают более низким напряжением сдвига, чем у металлов и своим разрушением предохраняют поверхность металла от задиров. Катализатором образования плёнки является высокая температура, таким образом, плёнка мгновенно восстанавливается в местах нарушения её целостности, при последующим за этим резким повышением температуры в зонах контакта с разрушенной плёнкой. Наличие сложных регулярных микрорельефов, полученных УЗПД может способствовать повышению эффективности образования защитных плёнок.

Поскольку исследование, проводится с целью использования полученных данных для обеспечения повышенного ресурса пар трения, работающих в условиях пограничного и смешанного смазывания, при выборе масла следует уделить большее внимание способности масел создавать тонкие плёнки с достаточной несущей способностью, при этом достаточно текучих для проникновения к поверхностям трения в малые зазоры.

Показателем способности масел создавать плёнку с определённой несущей способностью при некоторой минимальной толщине является вязкость. При рассмотрении этого качества масел используется кинематическая вязкость. Наиболее часто в средненагруженных механизмах

технологических машин применяются масла с кинематической вязкостью при 40 °С в диапазоне от 32 до 46 - 68 мм²/с. Данный диапазон значений вязкости обеспечивает достаточную несущую способность плёнки при малых её толщинах. Следует также учитывать, что рабочие температуры масел, применяемых для смазки технологического оборудования находятся в пределах 40 – 60 °С; пиковые достигают значений 80 °С [41].

Другим немаловажным аспектом выбора масла, применяемого в экспериментах является доступность смазочного материала.

Определившись с критериями отбора, рассмотрим подробнее перечисленные ранее группы масел.

2.5.1 Моторные масла

2.5.1.1 Масла, применяемые в автомобилях

Моторные масла применяются для смазывания поршневых двигателей внутреннего сгорания. В зависимости от назначения их подразделяют на масла для дизельных, бензиновых двигателей и универсальные. Их состав представляет из себя смесь базовых масел с улучшающими их свойства присадками. В качестве базовых масел применяются дистиллятные компоненты различной вязкости, остаточные компоненты, смеси остаточных и дистиллятных компонентов, а также синтетические продукты. Базовые моторные масла подразделяют на синтетические, частично синтетические и минеральные.

К моторным маслам предъявляются следующие эксплуатационные требования: высокая моющая и диспергирующе – стабилизирующая способности, пептизирующая и солубилизирующая по отношению к различным нерастворимым загрязнениям, обеспечивающих чистоту деталей двигателя. Кроме этого, масла должны обладать высокими термической и термоокислительной стойкостями, что позволяет применять масло в качестве

охлаждающей жидкости поршневой группы. Также, масла должны обладать противоизносными свойствами, что проявляется в прочности масляных плёнок, сохранением необходимой вязкости при высоких температурах, высоком градиенте скорости сдвига и способности химической модификации поверхности металла при граничном трении.

Основными направлениями работы моторных масел в ключе повышения износостойкости является обеспечение благоприятных вязкостно – температурных характеристик при пуске двигателя и при максимальных нагрузках при температуре рабочей среды.

Следует отметить, что большинство узлов и деталей двигателя, не имеющих автономных смазывающих систем, работают в условиях гидродинамической (подшипники коленчатого вала, поршневые кольца в сопряжении с цилиндром) и эластогидродинамической (детали механизма привода клапанов, зубчатые колёса масляных насосов) смазки. Условия граничной смазки наблюдается только вблизи мёртвых точек движения поршня при взаимодействии поршневых колец и стенки цилиндра.

При разработке моторных масел большое внимание уделяют моющим свойствам и свойствам, способствующим предотвращению коррозионно – механического износа; свойствам модификации тяжело нагруженных поверхностей во избежание задиров и усталостного выкрашивания, при этом, наиболее важным для моторных масел является группа вязкостно – температурных свойств [42 – 44].

Поскольку, применение УЗПД направлено на повышение эксплуатационных свойств поверхностей, работающих в условиях граничного смазывания, применение моторных масел, не предназначенных для постоянной работы в подобных режимах смазывания не рационально. Кроме этого, моторные масла обладают малой вязкостью (до $21,9 \text{ мм}^2/\text{с}$) и рассчитаны на более высокие рабочие температуры ($100 \text{ }^\circ\text{C}$ и более).

2.5.1.2 Масла, применяемые для авиационных двигателей

В зависимости от области применения, масла для авиационных двигателей делят на масла для поршневых, газотурбинных двигателей и масла для агрегатов вертолётов.

Масла поршневых двигателей работают в условиях высоких температур, давлений и нагрузок, что и определяет их свойства. Масла данной группы обладают высокой вязкостью, стабильностью к окислению в условиях высоких температур, присадки в составе обеспечивают хорошую смазывающую способность.

Турбореактивные двигатели имеют существенные отличия в конструкции, по сравнению с поршневыми: основным видом трения является трение качения, что обеспечивает на порядок меньший коэффициент трения, по сравнению с трением скольжения. Кроме этого масло в ГДТ изолировано от камеры сгорания. Также, хорошая конструктивная проработанность и сбалансированность таких узлов как вал турбокомпрессора, исключает возникновение больших радиальных и осевых нагрузок при высоких частотах вращения и обеспечивает условия работы без резких переменных нагрузок. В связи с этим, к маслам, применяемым в ГДТ предъявляются иные требования, чем для масел, работающих в поршневых двигателях.

Работа в условиях высоких температур (до 300 °С) и высоких частот вращения (до 12000 – 20000 мин⁻¹) требует от масла сохранения смазывающих свойств в диапазоне температур от – 50 до +200 С°, вязкостно – температурной стабильности и хорошей прокачиваемости, однородности и стабильности фракционного состава с минимальной испаряемостью для обеспечения сохранности вязкостных свойств масла в течение всего времени работы двигателя. Помимо этого, масла должны обладать высокими антиокислительными свойствами, минимальной вспениваемостью, высокой

температурой самовоспламенения и неагрессивностью к металлам, резинам, покрытиям и клеям.

Наиболее важной задачей масел ГДТ является теплоотвод из наиболее термонагруженных узлов и механизмов двигателей. Смазывающая способность и противозадирочные свойства обеспечиваются введением специальных присадок. Недостатком масел этой группы является склонность к выпадению в осадок при низких температурах эксплуатации присадок, содержащихся в смазочном материале.

Масла турбовинтовых двигателей отличаются от масел, применяемых в турбореактивных двигателях ещё большей вязкостью. Требования к противоизносным, противозадирочным свойствам, минимальной вспениваемости, устойчивости к окислению и стабильности вязкостно – температурных свойств идентичны, предъявляемым для ГДТ. Кроме того предъявляются требования к инертности масел по отношению к металлам, резинам, клеям.

Наиболее часто для смазывания турбовинтовых двигателей применяют маслосмеси, получаемые на месте применения смешением авиационных масел, применяемых для турбореактивных двигателей.

Вязкость масел, применяемых в поршневых авиационных двигателях составляет не более $20,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Вязкость масел, применяемых в турбореактивных двигателях не превышает $10 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $100 \text{ }^\circ\text{C}$. [42 – 45] Применение в экспериментах не целесообразно ввиду специфичности свойств и малой кинематической вязкости .

2.5.2 Трансмиссионные масла

Трансмиссионные масла предназначены для применения в узлах трения агрегатов и узлов автомобилей, различных транспортных машин, зубчатых редукторов и червячных передач промышленного оборудования.

Состав трансмиссионных масел представляет смесь базовых масел с легирующими его функциональными присадками. Также как и машинные, трансмиссионные масла делятся на минеральные, частично синтетические и синтетические.

Общие требования к трансмиссионному маслу варьируются в зависимости от конструктивных особенностей, назначения и условия эксплуатации агрегата трансмиссии.

Трансмиссионные масла работают в режимах высоких скоростей скольжения, давлений и широком диапазоне температур. Пусковые свойства и длительная работоспособность должны сохраняться в интервале температур от -60 до $+150$ °С.

Важнейшим свойством трансмиссионных масел является смазывающая способность, зависящая от вязкости. Кинематическая вязкость трансмиссионных масел имеет значения в диапазоне от 6 до 41 мм²/с при 100 °С. При более низких температурах кинематическая вязкость значительно выше. Ниже приведена номограмма Семенидо (рисунок 27), на оси абсцисс которой отложена температура, а на оси ординат – вязкость. По этой номограмме возможно найти вязкость при заданной температуре, если известна при двух других [42].

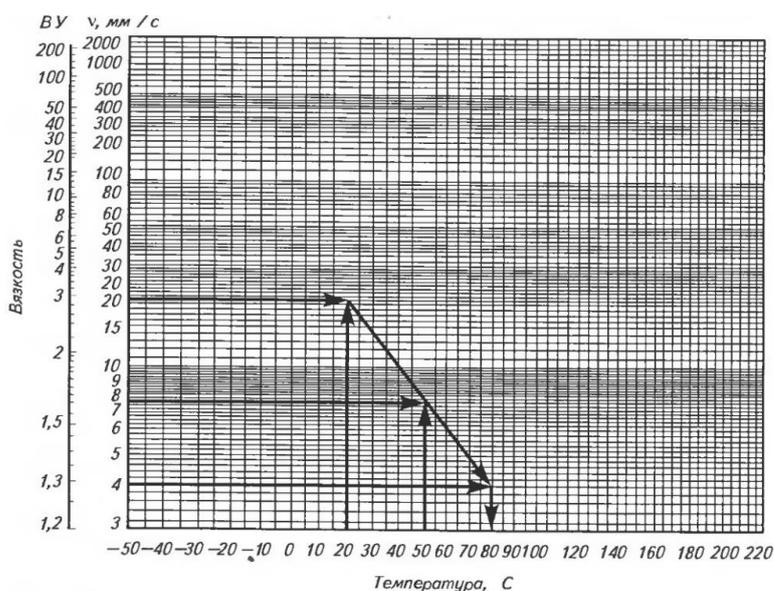


Рисунок 27– Номограмма Е.Г. Семенидо.

Так, масло имеющее кинематическую вязкость которого составляет при 100 °С 7,5 мм²/с, а при - 30 °С 7500 мм²/с, то при 60 °С будем иметь значение 45 мм²/с. Таким образом, отклонение температур применения масла от заложенных рабочих, значительно меняют смазывающие свойства. Таким образом, применение масел с высокими рабочими температурами требует особой осторожности, вследствие резких изменений смазывающих свойств. В течение считанных минут работы механизма, вязкость смазочного материала может уменьшится в разы, что значительно уменьшит несущую способность масляной плёнки, что может привести к значительному ухудшению условий смазывания. Применение масел с высокими рабочими температурами не является рациональным.

2.5.3 Индустриальные масла

Основным назначением индустриального масла является снижение трения и износа деталей металлорежущих станков, прессов, прокатных станов и другого промышленного оборудования. При этом они должны отводить тепло от узлов трения, осуществлять защиту поверхностей от коррозии, очищать поверхности трения от загрязнений, иметь малую вспениваемость, не образовывать стойких эмульсий с водой, хорошо фильтроваться, быть нетоксичным и не иметь неприятного запаха.

Ассортимент индустриальных масел поделён на несколько групп: масла общего назначения, масла для легконагруженных высокоскоростных механизмов, масла для гидравлических систем, масла для направляющих скольжения станочного оборудования, масла для тяжелонагруженных узлов, масла для прокатных станов и масла специального назначения. Необходимо дать краткую характеристику каждой группы.

В группу масел общего назначения входят нефтяные масла как с присадками (легированные), так и без присадок с вязкостью при 50 °С в диапазоне от 2,2 до 190 мм²/с. Сырьём для этих масел служат малосернистые и сернистые нефти. Масла предназначены для смазывания наиболее распространённых узлов и механизмов оборудования в различном промышленном оборудовании. К маслам без присадок не предъявляются особых требований, их эксплуатационные свойства обеспечиваются естественной нефтяной природой масел. Масла без присадок применяются в машинах и механизмах промышленного оборудования, условия работы которых не требуют высоких антиокислительных и антикоррозионных свойств, а также в качестве гидравлических жидкостей. Одним из критериев рассмотрения номенклатуры масел является вязкость в диапазоне 32 – 68 мм²/с. По этой причине, целесообразно рассмотреть масла, объединённые в подгруппу И-20А, И-30А, И-40А, И-50А.

Масла И-20А, И-30А, И-40А, И-50А изготавливаются из дистиллятной или смеси дистиллятной и малосернистой нефтей путём селективной очистки. Их применяют в качестве рабочих жидкостей в гидравлических системах станочного оборудования, автоматических линий, прессов, для смазывания легко – и средненагруженных зубчатых передач, направляющих качения и скольжения станков и других механизмов, где не требуется специальных масел. Применение указанных масел зависит от нагруженности и быстроходности механизмов. Масляные плёнки более вязких масел обладают большей несущей способностью, и применяются в менее быстроходных механизмах. Заменителями этих масел могут выступать легированные индустриальные масла ИГП – 18, ИГП – 30, ИГП – 49 соответствующей вязкости.

Группа легированных масел включает в себя масла с определённым комплексом свойств, обеспечивающих универсальность. Индустриальные масла И-Л-С и ИГП выпускают из дистиллятной, остаточной нефтей или их

смеси путём глубокой селективной отчистки. Наделение масел повышенным антиокислительным, противоизносным, антикоррозионным и антипенным свойствами осуществляется путём добавления присадок. Данные масла находят применение в качестве смазочного материала технологического оборудования, техники народного хозяйства и механизмах, требующих применения масел с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Масла ИГП – 18, ИГП – 30, ИГП – 49 служат рабочими жидкостями в гидравлических системах станков, автоматических линий, прессов. Применяются для смазывания мало – и средненагруженных редукторов и червячных передач, вариаторов, электромагнитных и зубчатых муфт, подшипниковых узлов, направляющих качения и скольжения, механизмах, требующих улучшенных антиокислительных и противоизносных свойств.

Масла для легконагруженных высокоскоростных механизмов представлены в диапазоне вязкостей от 2,2 до 15,5 мм²/с при температуре 50 °С. Производятся из малосернистых и сернистых нефтей селективной отчистки. Выпускаются как с присадками, так и без их добавления. Служат для смазывания высокоскоростных механизмов металлорежущих станков, текстильных машин сепараторов, центрифуг и сопряжённых с ними соединений. Ввиду малой вязкости масел данной группы, дальнейшее рассмотрение не представляется целесообразным.

Масла для гидравлических систем применяются в качестве рабочих жидкостей гидравлических систем металлорежущих станков, автоматических линий, прессового и другого промышленного оборудования. Вследствие высоких нагрузок в узлах и агрегатах перечисленного технологического оборудования, масло наделено улучшенными противозвдирными, противоизносными, антиокислительными и антикоррозионными свойствами. При высоких рабочих давлениях (от 16 до 35 МПа) используются масла с вязкостью от 16 до 118 мм²/с при температуре 50 °С. Для целей обслуживания таких механизмов применяют масла общего

назначения. В гидравлических системах со специфическими свойствами используются легированные маловязкие масла, со сгущающими и прочими присадками [42 – 45].

В группу масел для направляющих скольжения станочного оборудования входят дистиллятные и смеси дистиллятных и остаточных масел. Имеются как легированные, так и масла без присадок. Кинематическая вязкость масел этой группы варьируется от 20 до 120 мм²/с при температуре 50 °С. Масла применяются для смазывания горизонтальных и вертикальных направляющих скольжения и качения подвижных узлов, передач ходовой винт – гайки, для легко – и средненагруженных зубчатых и червячных передач, гидродинамических направляющих станочного оборудования и для некоторых узлов текстильных машин. Особенность масел данной группы заключается в свойствах, обеспечиваемых пакетом добавляемых присадок. Помимо антиокислительных, противозадирных и антипенными свойств обладают противоскачковым (обеспечение равномерного движения), противоржавейным, депрессорным (понижение температуры застывания масла) свойствами и повышенной фильтруемостью. Концентрация легирующих присадок может быть достаточно велика, поэтому в состав масел могут входить солибилизирующие присадки, улучшающие растворимость прочих присадок в базовом масле.

На основе изученных материалов, касающихся номенклатуры масел, применяемых в различных механизмах промышленности можно сделать вывод о том, что различия свойств групп масел, выпускаемых для различных областей применения обеспечивается пакетом присадок и свойствами базовых масел, в случае легированных масел и исключительно свойствами базовых масел, в случае масел без присадок. Добавление присадок в базовое масло обеспечивает полученный смазочный материал специфическими свойствами, такими как антипенные, антиокислительные, улучшенные вязкостно – температурные, противозадирные. Реализация возможностей

данных присадок возможно только в условиях работы, для которых предназначены эти масла [42 – 45].

При проведении экспериментов по определению смачиваемости, реализация свойств масла, обеспеченных присадками невозможна, вследствие отсутствия условий их активации. Таким образом, выбор легированных масле не представляется рациональным.

Многие из перечисленных масел имеют рабочие температуры, равные или превышающие 100 °С, соответственно, заявленная для этого масла вязкость будет достигаться только при данной температуре. Общим для всех масел является свойство роста вязкости при понижении температуры. Таким образом, при использовании высокотемпературных масел при температурах ниже рабочих, становится достаточно затруднительно прогнозировать вязкость при пуске, в установившемся режиме работы. Неточность в прогнозировании в лучшем случае может провоцировать понижение КПД машины, а в худшем – стать причиной преждевременного выхода из строя механизма, вследствие ухудшения таких свойств как прокачиваемость, вслед за увеличением вязкости или увеличения минимальной толщины масляной плёнки, вследствие чего, может значительно уменьшится доступность для масла поверхностей трения с малыми зазорами. По этой причине, применение высокотемпературных масле не целесообразно.

Следующим критерием выбора смазочного материала выступает доступность. Наибольшей доступностью обладает группа промышленных масел общего назначения. Помимо доступности, масла данной группы соответствуют требованиям эксперимента с точки зрения температурно - вязкостных свойств. Таким образом, с учётом вышесказанного, наиболее рационально производить выбор смазочного материала из подгруппы масел: И-20А, И-30А, И-40А, И-50А. Кинематическая вязкость каждого из этих масел указана для температуры 40 °С. Для проведения эксперимента Наиболее подходящим среди доступных является масло И-40А с вязкостью

61 мм²/с при температуре 40 °С. Даже с учётом проведения эксперимента при комнатной температуре, вязкость масла укладывается в поставленные рамки (от 32 до 68 мм²/с).

Выводы по 2 главе

В данной главе проведен анализ существующих методик оценки маслостойкости поверхностей. На основе анализа произведен выбор методик, наиболее целесообразных для оценки маслостойкости поверхностей экспериментальных образцов.

Для подготовки экспериментальных образцов назначены режимные параметры обработки в соответствии с технологическими возможностями имеющегося оборудования. Описаны некоторые технологические решения по подготовке оборудования к проведению экспериментов. Выбор режимов осуществлялся с использованием математического моделирования, позволяющего рассчитать размеры фрагментов регулярного микрорельефа и спрогнозировать состояние обработанной поверхности по наличию или отсутствию волнистости.

Для проведения экспериментов по оценке смачиваемости обработанных поверхностей проведен анализ масел с целью обоснования выбора марки, используемой в экспериментах. Показано, что наиболее подходящим по своим характеристикам среди доступных является масло И-40А.

3 Экспериментальное исследование зависимости маслосмачиваемости формируемого рельефа от режимов УЗПД

Раздел представляет собой описание совокупности экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния режимов обработки методом УЗПД на свойство поверхности смачиваться. Оценка ведется опосредованно через параметры формируемого микрорельефа, поскольку выше было показано, что именно форма и размеры фрагментов рельефа в большей степени влияют на смачиваемость. Смачиваемость оценивается методом сидячей капли ввиду простоты и доступности методики. Подбор доз масла осуществлялся также экспериментально.

3.1 Подготовка образцов перед обработкой УЗПД

Одной из задач проведения УЗПД поверхности является создание нового регулярного микрорельефа без следов предшествующей обработки. Обеспечение подобного эффекта требует соблюдения некоторых ограничений, касающихся исходной шероховатости обрабатываемых поверхностей.

На рисунке 28 показано сканированное изображение поверхности после ультразвукового пластического деформирования.

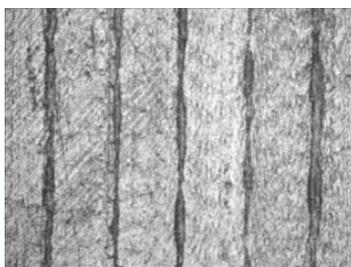


Рисунок 28 – Следы предшествовавшей обработки.

На поверхности присутствуют следы токарной обработки в виде канавок от резца, расположенных на расстоянии подачи (S). В работе [1]

проводилось экспериментальное исследование влияния исходной шероховатости на результаты УЗПД. При обработке незакалённой стали 45 УЗПД при режимах: частота колебаний 22 кГц, амплитуда – 25 мкм, статическое усилие – 250 Н, скорость вращения детали – 110 м/мин, подача – 0,1 мм/об, диаметр деформирующего элемента – 8 мм, выяснено, что формирование новой микрогеометрии, возможно, при выполнении ограничения $Ra < 2$ мкм.

Подготовка образцов производилась, исходя из данных рекомендаций.

Пруток стали 45 диаметром 45 мм обработан на токарном станке до 10 качества и шероховатости поверхности $Ra 2$ мкм.

3.2 Определение размера капель масла, используемых в экспериментах

Для оценки смачиваемости поверхности методом сидячей капли необходимо установить размер и объём капли выбранной для эксперимента жидкости. Изучение этого вопроса требует учёта факторов, влияющие на образование капли, приведение теоретического расчёта размера капли и экспериментальная проверка полученных данных.

Основой проводимых экспериментов является наблюдение за поведением капли, помещённой на вертикальную поверхность. Под поведением подразумевается способность капли оставаться неподвижной при нанесении на вертикальную поверхность, постоянство или изменение краевых углов капли, или её движение под действием гравитационных сил. Обеспечение релевантности эксперимента требует создания условий, способствующих его повторяемости, что достижимо путём дозирования капель жидкости, задания их фиксированного объёма и, соответственно, размера.

Для полноценного рассмотрения вопроса необходимо определиться с используемой терминологией. Под каплей подразумевается небольшой

объём жидкости, ограниченный поверхностью, определяемой преимущественно действием сил поверхностного натяжения. Капли формируются одним из следующих способов:

- при стекании жидкости с края поверхности или из малых отверстий
- при конденсации (водяного) пара:
 - на твёрдой несмачиваемой поверхности: например, роса — при конденсации на поверхностях
 - на центрах конденсации: например, туманы и облака — при конденсации на пылинках воздуха
- при распылении жидкости
- при эмульгировании

Форма капли определяется совокупным действием поверхностного натяжения и внешних сил: силы тяжести и аэродинамическими силами. В естественных условиях для капель небольшого размера (1 мм и менее) преобладающей является сила поверхностного натяжения, придающая такой капле форму тем более близкую к сферической, чем меньше капля. При этом, умеренные изменения формы капли наблюдаются при диаметре 2 мм, а значительное уплощение капли наблюдается при достижении диаметра описанной окружности 4 мм [46]. В источнике рассматривается поведение капель воды, коэффициент поверхностного натяжения которой 0,0728 Н/м. Смазочные материалы, такие как масла обычно имеют меньший коэффициент поверхностного натяжения, чем у воды. В дальнейшем, рассматривать процесс оценки размера капель для выбранного ранее масла И – 40. Масло И – 40, применяемое в эксперименте, имеет коэффициент поверхностного натяжения 0,0292 Н/м, что в 2,4 раза коэффициент поверхностного натяжения воды [47]. Соответственно, размер наибольший объём, дозированной капилляром капли окажется значительно меньшим. В случае равных плотностей сравниваемых жидкостей, изменение коэффициента поверхностного натяжения способно прямо пропорционально

влиять на объём капли. Плотность масла И – 40 составляет 880 кг/м^3 против $998,23 \text{ кг/м}^3$ у воды. Таким образом, плотность воды выше плотности И – 40 в 1,13 раза. Учитывая что, объём капли имеет обратную зависимость от плотности вещества, а, так же, принимая во внимание разницу в величине коэффициента поверхностного натяжения, можно прийти к выводу, что объём капли масла из идентичного капилляра в 2,12 раза меньше капли воды. Математические выкладки, подтверждающие вышесказанное, приведены далее.

Сферическая форма капли наиболее подходит для проведения эксперимента по определению степени смачиваемости, поскольку ей свойственен малый размер и, в связи с этим, стабильность, что сводит к минимуму склонность капли к разрушению из – за большой массы. Однако, сферическая капля при этом достаточно велика для того, чтобы начать движение под действием собственного веса по вертикальной поверхности изучаемого образца.

Проведение эксперимента подразумевает нанесение капли при помощи капилляра на вертикальную поверхность изучаемого образца. По фотоснимкам наблюдений, при помощи геометрических построений, производится вычисление кинетических краевых углов смачивания. Величина этих углов позволяет получить относительную количественную оценку степени смачиваемости сравниваемых поверхностей.

В пользу применения капилляра как средства нанесения капель говорит следующий факт: форма и размер капли, отделяющейся от конца капиллярной трубки, в значительной степени зависят от диаметра трубки, а также от поверхностного натяжения и плотности жидкости [47]. Тем самым, рациональным выбором размера канала капилляра обеспечивается достаточно точное дозирование капли жидкости.

В качестве инструмента, дозирующего каплю, использован шприц рабочим объёмом 2 мл, оснащённый иглой 23G, с внешним диаметром 0,6 мм, диаметром канала 0,25 мм и длиной стержня иглы 30 мм [48, 49].

Необходимо определить соответствие получаемых через этот капилляр капель требованиям к объёму капель посредством теоретического расчёта и натурального эксперимента для подтверждения теоретических данных.

Следует провести теоретический расчёт объёма капли масла. На рисунке 29, капля задерживается на конце трубки за счёт силы поверхностного натяжения. Эта сила пропорциональна длине границы между жидкостью и трубкой. Формула (1) для её расчёта представлена ниже [50].

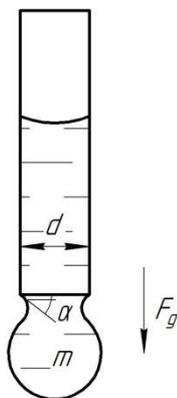


Рисунок 29 – Схема образования капли.

$$F = \pi d \gamma ,$$

где γ — коэффициент поверхностного натяжения, измеряемый в Ньютонах на метр, Н/м.

Капля не отрывается, пока эта сила способна нейтрализовать силу тяжести, действующую на каплю в вертикальной проекции, то есть:

$$mg = \pi d \gamma \sin \alpha$$

При увеличении массы капли, то есть при её росте, угол α будет стремиться к 90° , и, в состоянии равновесия сил, формула примет вид:

$$mg = \pi d \gamma$$

,откуда масса капли (г):

$$m = \frac{\pi d \gamma}{g}$$

Таким образом, объём капли равен (мл):

$$v = \frac{m}{\rho}$$

Данный расчёт несёт в себе допущения, касающиеся процесса образования капли. Капля отделяется от капилляра, образуя шейку, диаметр которой меньше диаметра канала капилляра. Однако, данный расчёт достаточно точен в инженерных целях [47].

Степень соответствия результатов расчёта объёма отделяемой от капилляра капли определялась путём проведения натурального эксперимента. Суть эксперимента в подсчёте количества капель отделившихся от капилляра, при вытеснении определённого объёма жидкости из полости цилиндра шприца. В эксперименте применяется шприц рабочим объёмом 2 мл, изготовленный в соответствии с ГОСТ ISO 7886 – 2011. Для обеспечения точности и повторяемости эксперимента, следует определить объём жидкости, применяемом в натурном эксперименте.

Исходя из норм вышеуказанного стандарта, погрешность на градуированную вместимости при заполнении шприца менее, чем на половину составляет $\pm 1,5\%$ от объёма шприца + 2% от слитого объёма. Таким образом, при наборе 0,5 мл жидкости погрешность составит 0,04 мл.

Также у шприца имеется «мёртвое пространство» в месте соединения иглы с цилиндром. У шприца рабочим объёмом в 2 мл оно составляет 0,07 мл. То есть при проведении эксперимента суммарная погрешность может достигать 0,11 мл при слитии 0,5 мл жидкости, что составляет 20% объёма.

При наполнении шприца на половину рабочего объёма и более погрешность составляет $\pm 5\%$ слитой жидкости и с учётом «мёртвого пространства» составит 0,12 мл, что при объёме 1 мл составит 12%; при объёме 1,5 мл 9,6% (0,145 мл), при объёме 2 мл 8,5% (0,17 мл) [48].

Таким образом, натурный эксперимент следует проводить с объёмами 1,5 и 2 мл.

В ходе расчётов установлено, что при диаметре канала капилляра 0,25 мм, плотности $\rho = 880 \text{ кг/м}^3$ и коэффициентом поверхностного натяжения $29,2 \times 10^{-3} \text{ Н/м}$, объём капли составляет 0,00259 мл, масса 0,0023 г [41]. Результаты натурального эксперимента приведены в таблицах 9,10.

Таблица 9 – Экспериментальное определение количества капель в 1,5 мл жидкости

№ эксперимента	1	2	3	4	5
кол - во капель	578	562	575	578	572

Среднее количество капель: 573

Объём капли $0,00261 \pm 0,0006 \text{ мл}$

Таблица 10 – Экспериментальное определение количества капель в 2 мл жидкости

№ эксперимента	1	2	3	4	5
кол - во капель	775	773	770	768	778

Среднее количество капель: 773

Объём капли $0,00258 \pm 0,00057 \text{ мл}$

Отталкиваясь от полученных в ходе рассмотрения вопроса данных, можно сделать вывод о том, что представленные в работе теоретические расчёты с достаточной точностью позволяют определять объём полученной капиллярным способом капли жидкости, что подтверждено натурным экспериментом. Полученные через капилляр с диаметром канала 0,25 мм капли, в диаметре, исходя из расчётов, при объёме 0,00259 мл составили 0,85 мм, что меньше диаметра, при котором наблюдаются умеренные изменения формы и поведения капли. Тем самым, объём и размер полученной капли можно считать рациональным для подготавливаемого эксперимента.

3.2 Оценка смачиваемости обработанных поверхностей

Проведение экспериментов производится при использовании метода сидячей капли на вертикальной поверхности. В качестве масла используется масло индустриально И – 40А, в качестве капилляра используется шприц рабочим объёмом 2мм, оснащённый иглой 23G.

Для оценки продуктивности УЗПД как способа обеспечения улучшения способности смачиваться, производится оценка смачиваемости полированной поверхности (рисунок 30).

Исходя из результатов измерения, угол натекания $\theta_{нт} = 42^{\circ}5'$, угол оттекания $\theta_{от} = 16^{\circ}$. Поверхности, углы смачивания которых менее 90° являются смачиваемыми, поверхности, обладающие углами смачивания менее 45° , являются гидрофильными или олеофильными. Ранее проведённые изыскания говорят о том, что полируемая поверхность вследствие малой шероховатости имеет сниженные способности смачиваться. Таким образом, значения краевых углов, полученных при измерении смачиваемости образцов, обработанных УЗПД, исходя из ранее изученных теоретических сведений, не должны превышать полученные, при оценке смачиваемости полированной поверхности. Ниже приведены результаты измерения краевых углов образцов обработанных УЗПД (рисунки 31, 32, 33).

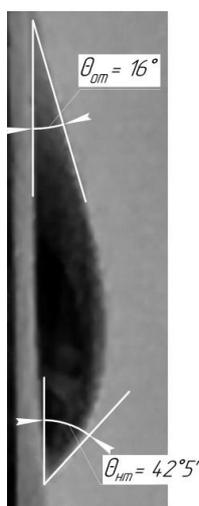


Рисунок 30 – Краевые углы смачивания полированной поверхности.

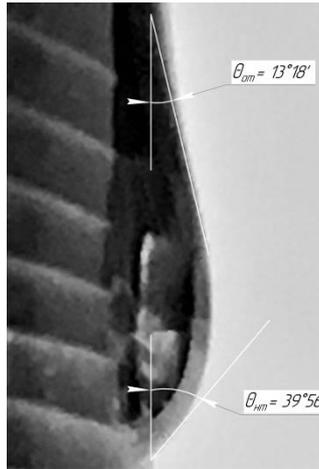


Рисунок 31 – Краевые углы смачивания поверхности со значительно развитым макрорельефом ($l_v^2/l_s^2 = 3,17$).

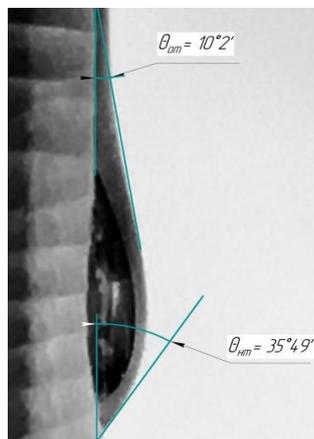


Рисунок 32 – Краевые углы смачивания поверхности с развитым макрорельефом ($l_v^2/l_s^2 = 2,51$).

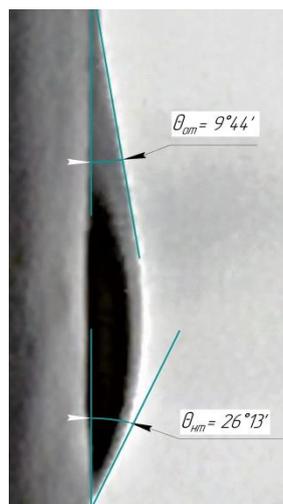


Рисунок 33 – Краевые углы смачивания поверхности с симметричным и близким к равновесному макрорельефами ($l_v^2/l_s^2 = 1,3$).

По итогам обработки полученных изображений можно сделать вывод о значительном влиянии образованного УЗПД микрорельефа на смачиваемость образцов. Из представленных образцов наихудшую смачиваемость проявила полированная поверхность с малой шероховатостью (рисунок 30). Образец, обработанный на режимах, способствующих образованию несимметричного искажённого микрорельефа (рисунок 31) и, как следствие волн течения, проявил незначительно большую способность смачиваться (в 1,08 раза лучше, чем у полированной поверхности). Вместе с тем, капля имела свойство замедлять течение на некоторых участках образованного рельефа. Помимо этого, капля имела склонность исказить форму, увеличивая периметр смачивания в направлении, противоположном направлению течения. Образец с меньшей степенью искажения микрорельефа (рисунок 32), показал краевой угол натекания на 17% меньший, нежели полированная поверхность, практически не проявляя склонностей к искажению формы или неравномерному течению. Образец с симметричным рельефом (рисунок 33) показал угол натекания на 39% меньший, чем у полированной поверхности. При этом поведение капли было стабильным.

3.3 Анализ полученных результатов

Образцы, обработанные УЗПД, отличаются в разной степени улучшенными свойствами смачиваться. Даже в случае несимметричных форм фрагментов микрорельефа и образования значительно развитых макрорельефов, смачиваемость образцов, обработанных УЗПД, превосходит таковую полированных образцов (таблица). В ходе экспериментов обнаружена закономерность уменьшения краевых углов по мере уменьшения проявлений макрорельефа поверхности.

При проведении фиксации результатов и последующей обработке полученных изображений обнаружено, что развитый макрорельеф,

представляющий собой волны течения металла, несколько изменяет поведение протекающего по нему капля. Скорость течения капли снижена, капля стремится увеличить периметр смачивания в направлении перпендикулярном направлению течения. Волны пластического течения способны создавать условия течения, благоприятные для установления метастабильного состояния капли.

Таблица 11– Значения краевых углов образцов

№	V, м/мин	S, мм/об	l_v^2/l_s^2	$\theta_{нт}$, град	$\theta_{от}$, град
1	226	0.15	1,3	26°13′	9°44′
2	141,37	0,1	1,4	28°2′	9°45′
3	176	0,1	1,79	30°35′	9°47′
4	113,1	0,06	2,51	35°49′	10°2′
5	89,06	0,05	3,17	39°56′	13°18′
Полированная поверхность				42°5′	16°

В случаях малоразвитого макрорельефа и относительно равновесных и равновесных микрорельефов наблюдается значительно уменьшение значений краевых углов, что свидетельствует о существенном повышении степени смачиваемости обработанных УЗПД поверхностей. В соответствие с этим, режимы обработки должны обеспечивать создание наиболее симметричного микрорельефа, не создавать условий для значительного развития волн течения.

Полученные в ходе изысканий данные позволяют сделать вывод о продуктивности применения УЗПД в качестве метода, улучшающего свойство смачиваться обработанных поверхностей.

3.4 Рекомендации по назначению режимов ультразвукового поверхностного пластического деформирования

В ходе анализа полученных результатов и теоретических данных, можно выделить следующие закономерности по управлению смачиваемостью:

- обеспечение повышенной смачиваемости поверхности требует в первую очередь, соблюдения условия перекрытия следов предшествовавшей обработки, путём достижения глубины внедрения индентора, достаточной для формирования отпечатка, превосходящей высоту микронеровностей предшествовавшей обработки и диаметра, достаточного для обеспечения перекрытия. Перекрытие обеспечивается наложением отпечатков. Это достижимо заданием рациональных статических усилий. Выбор статических усилий стоит производить исходя из значений пластической твёрдости материала. При большем значении пластической твёрдости допускается назначать большие значения статического усилия для получения идентичного по размерам отпечатка;

- применение подач и скоростей больших значений способствует увеличению расстояния между очагами деформации, что снижает упрочняющий эффект обработки. В связи с этим, при больших значениях окружной скорости и подачи рекомендуется производить многозаходную обработку. При этом, наилучшая степень смачиваемости при обработке стали 45 получена при обработке в диапазонах режимов: $V = 176 \dots 226$ м/мин; $s = 0,1 - 0,15$ мм/об при частоте ультразвуковых колебаний 22 кГц, амплитуде $2A=25$ мкм и статическом усилии 150 Н;

- не менее важным является обеспечение формирования симметричного или близкого к симметричному регулярного микрорельефа, наличие которого уменьшает работу продвижения периметра смачивания жидкости. Достижение симметричных микрорельефов возможно варьированием

окружной скорости и подачи. При этом наиболее важным является обеспечения соотношения расстояний между соседними отпечатками в направлении окружной скорости l_v и направлении подачи l_s . Соотношением, обеспечивающим симметричный микрорельеф, является $l_v^2/l_s^2 = 4/3$;

- еще одним условием обеспечения смачиваемости является устранение или сведение к минимуму волнообразования на обрабатываемых поверхностях. Это явление наиболее актуально для поверхностей материалов с невысокой твердостью. Оно устраняется путем увеличения значений скорости и подачи при обработке.

Выводы по 3 главе

Проведенные экспериментальные исследования показали, что ультразвуковое пластическое деформирование действительно влияет на способность поверхности смачиваться. При этом наблюдается зависимость смачиваемости от режимов обработки: обнаружена закономерность уменьшения краевых углов по мере уменьшения волнистости. Наиболее явное значение на смачиваемость оказывают кинематические параметры обработки, такие как скорость и подача, т.к. они определяют размер фрагментов микрорельефа и вероятность появления волнистости. Показано, что при увеличении размеров фрагментов и при повышении их симметричности (когда фрагмент в направлении скорости и подачи имеет равные или близкие по значению размеры) смачиваемость возрастает.

На основе анализа результатов эксперимента сформированы рекомендации по назначению режимных параметров обработки для обеспечения смачиваемости.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Проведённый литературный анализ выявил перспективность метода ультразвукового пластического деформирования (УЗПД), с точки зрения Управление качеством обрабатываемой поверхности. Показано, что ультразвуковая обработка позволяет управлять степенью упрочнения, шероховатостью, формой и размерами фрагментов микрорельефа. Данные параметры определяют эксплуатационные свойства обработанной поверхности степени. При этом остается малоизученным вопрос смачиваемости обработанных поверхностей. Недостаток информации по управлению смачиваемостью поверхностей посредством варьирования режимами УЗПД позволяет сделать вывод об актуальности представленных в данной работе результатов исследований. Отсутствие рекомендаций по назначению режимов УЗПД, позволяющих формировать микрорельеф с улучшенной смачиваемостью, а также отсутствие рекомендаций по выбору методики оценки степени смачиваемости обработанных поверхностей определили основные задачи исследования.

В ходе работы, на основе существующих источников определены допустимые диапазоны режимов УЗПД ($F_{ст} = 50...250$ Н; $V = 50...250$ м/мин; $s = 0,01 - 0,2$ мм/об), применяемые при проведении экспериментов для изучения закономерностей формирования смачиваемости поверхностей в зависимости от режимов. На основе требований к чистоте поверхностей, подвергающихся УЗПД ($Ra = 2$ мкм) подготовлены экспериментальные образцы, предварительно обработанные точением.

Путём анализа отечественных и зарубежных источников определена методика оценки степени смачиваемости без применения узкоспециальной аппаратуры, с точностью, достаточно для инженерных целей. Процедура оценки смачиваемости базируется на методах определения смачиваемости по скорости растекания масляного пятна для качественной оценки и метода

сидячей капли на вертикальной поверхности для количественного определения степени смачиваемости.

Для проведения экспериментов по определению степени смачиваемости подобрана рабочая жидкость, наиболее удовлетворяющая требования по доступности и кинематической вязкости. Значение кинематической вязкости данного масла ($68 \text{ мм}^2/\text{с}$ при температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$) соответствует значениям масел, применяемым в большинстве технологических машин.

В ходе экспериментов выяснено, что обеспечение наиболее симметричных микрорельефов с мало выраженной или отсутствующей волнистостью обеспечивает значительный рост степени смачиваемости обработанных УЗПД поверхностей. Так, при обеспечении сочетанием скорости и подачи величины коэффициента $l_v^2/l_s^2 = 1,3$ ($F_{\text{ст}} = 150 \text{ Н}$, $f = 22 \text{ кГц}$, $D_{\text{и}} = 0,008 \text{ м}$; $s = 0,15 \text{ мм/об}$; $V = 226,19 \text{ м/мин}$) достигнуто уменьшение краевого угла натекания на 39% (с $42^\circ 5'$ до $26^\circ 13'$), по сравнению с образцом, подвергшемся полированию, что говорит о существенном снижении работы жидкости по продвижению периметра смачивания и повышении адгезии поверхности. Такой вывод можно сделать на основании того, факта, что смачиваемость является следствием проявления адгезии.

Определено, что высокие степени искажения микрорельефа, связанные с диспропорциональным назначением окружной скорости и подачи (величина l_v^2/l_s^2 значительно больше $1,3$) в малой степени влияют на смачиваемость поверхности. Так, при $l_v^2/l_s^2 = 3,17$ ($F_{\text{ст}} = 150 \text{ Н}$, $f = 22 \text{ кГц}$, $D_{\text{и}} = 0,008 \text{ м}$; $s = 0,05 \text{ мм/об}$; $V = 89,06 \text{ м/мин}$), угол натекания уменьшился на 8% . Тем самым подтверждаются предположения о положительном влиянии УЗПД на смачиваемость поверхности.

При этом, наилучшая степень смачиваемости получена при обработке в диапазонах режимов: $F_{\text{ст}} = 150 \text{ Н}$, $f = 22 \text{ кГц}$, $D_{\text{и}} = 0,008 \text{ м}$; $V = 176...226 \text{ м/мин}$; $s = 0,1 - 0,15 \text{ мм/об}$.

На основе полученных данных сформированы рекомендации приведённые в разделе 3.4, по назначению режимов УЗПД, обеспечивающих смачиваемость поверхности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Технологические ограничения режимных параметров ультразвукового пластического деформирования/ Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова //Иновации в топливно – энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК 2017) – 2017– С. – 187 – 192.
2. Любимов В.В., Волгин В.М., Гнидина И.В., Обоснование микро - и нанорельефов на поверхности режущего инструмента и выбора методов их получения/ В.В. Любимов, В.М. Волгин, И.В. Гнидина// Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – №. 1. – С. 148 – 159.
3. Миронов Е.Е., Современные технологии повышения долговечности поршневых колец/ Е.Е. Миронов // Вестник НГИЭИ. – 2010. - № 1(1). – С. 75 – 85.
4. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В., Физико – химические основы смачивания и растекания: монография / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов – М.; Издательство Химия, 1976. - 232 с. ил.
5. Зимон А.Д., Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон – М., Издательство Химия, 1974. - 416 с. ил.
6. Vollmer H., Neue Methoden zur Analyse der Benetzung von Pkv – Seitenscheiben / H. Vollmer, - Stuttgart, Deutschland; Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018. - 125 с. ил.
7. Gopal E.S.R., Kitchener J.A., Mussellwhite P.R., Sherman P., Emulsion science (Эмульсии) под редакцией Sherman P.: перевод с английского под редакцией А.А. Абрамзона/ E.S.R. Gopal, J.A. Kitchener., P.R. Mussellwhite, P. Sherman – Л.; Издательство Химия, 1972. - 448 с. ил.
8. Eral H.B., D.J.C.M. 't Mannetje D.J.C.M., Oh J.M., Contact angle hysteresis: A review of fundamentals and applications / H.B. Eral, D.J.C.M. 't Mannetje, J.M. Oh// Colloid and Polymer Science – 2013. – 291(2). С. – 247–260.

9. Горюнов Ю.В., Триботехника (износ и безизносность): учебник / Ю.В. Горюнов – М., Издательство «МСХА», 2001. – 616 с. ил.
10. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст]. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
11. Беркович И.И., Громаковский Д.Г., Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г., Громаковский – Самара., Издательство «Самарский государственный технический университет». 2000. – 268 с. ил.
12. Вохидов А. С., Многофункциональные нанопленки Эпилам: соединение и взаимодействие смазочных композиций с поверхностью / Вохидов А. С., Мисюрязев А.А. //Станочный парк . — 2016. — №3(133). — с.30-32.
13. Вохидов А. С., Покрытия из фторПАВ в машиностроении / Вохидов А. С., Добровольский Л.О. //Сборник материалов Всероссийской научно - практической конференции «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве». Магнитогорск. — 2011.
14. Клинов И.Я., Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы/ И.Я. Клинов – М.: Машиностроение, 1967. – 468 с., ил.
15. Мамаев В.И., Функциональная гальванотехника/ В.И. Мамаев – Киров.: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. – 208 с., ил.
16. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. Пособие (в 2-х томах). Т. I. Обработка материалов с применением инструмента/ Под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. Шк., 1983. – 247 с., ил.
17. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник.-М.: Машиностроение, 1987, 328 с., ил.
18. Мельников П.А., Пахоменко А.Н., Лукьянов А.А., Математическая модель формирования микрорельефа шейки вала при обработке

- алмазным выглаживанием/ П.А. Мельников, Пахоменко А.Н., А.А. Лукьянов// Вектор науки ТГУ. - 2015. - № 2 (32-2). – С. 104 – 110.
- 19.Лазарев С.Ю., Головлев Г.А. Свойства поверхности стали 45 с покрытиями из минеральных материалов// «Металлообработка» - 2011.- №5(65). - с. 28, ил.
- 20.Григорьев С. Н., Табаков В. П., Волосова М. А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол: ТНТ, 2011. С. 378
- 21.Казанцев В.Ф., Кудряшов Б.А., Нигметзянов Р.И., Ультразвуковое пластическое поверхностное деформирование/ В.Ф. Казанцев, Б.А. Кудряшов, В.М. Приходько, Д.С. Фатюхин// Вестник харковского национального автомобильно – дорожного университета. – 2009. - № 46. – С. 7 – 9.
- 22.Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании/ Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова// Обработка металлов. – 2012. – №3(56). – С. 33 – 36.
- 23.Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Формирование морфологии поверхности в процессе ультразвукового пластического деформирования деталей машин/ Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова//Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №10(70). – С. – 20 – 23 .
- 24.Рахимьянов Х.М., Никитин Ю.В., Семенова Ю.С., Условия образования волнистости поверхности при ультразвуковом пластическом поверхностном деформировании металлических материалов/ Х.М. Рахимьянов, Ю.В., Никитин, Ю.С. Семенова// Обработка металлов. – 2012. - № 1(54). – С. – 4 – 9.
- 25.Патент СССР № 3321642/25-08, 20.07.1981.

- Способ определения маслостойкости трения // Патент СССР № 985549.1982. Бюлл. 48 / Радионенко А.В.
26. Щукин Е.Д., Коллоидная химия: Учеб. для университетов и химико – технол. вузов/ Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелица. – М.: Высш. шк., 2004. - 445 с. : ил.
- 27.Киселёв М.Г., Савич В.В., Павич Т.П., Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях/ М.Г. Киселёв, В.В. Савич, Т.П. Павич// Вестник БНТУ. – 2006. - №1 – С. – 38 – 40.
- 28.Kock-Yee Law, Hong Zhao, Surface Wetting Characterization, Contact Angle, and Fundamentals / Law Kock-Yee, Zhao Hong - Springer, Cham, 2016. – 162 с. илл.
- 29.Lee L.H., Fundamentals of Adhesion/ L.H. Lee// Springer, Boston, MA 1991. – 454 с. илл.
30. Krasovitski B., Marmur A., Drops Down the Hill: Theoretical Study of Limiting Contact Angles and the Hysteresis Range on a Tilted Plate / B Krasovitski, A. Marmur//Langmuir. – 2005. - № 21(9). С. – 3881 – 3885.
- 31.Nushtaeva A.V., Contact angles of selective wetting hexylamine – modified silica surface/ A.V. Nushtaeva// Elsevier, - 2014. - №451(1). – С. – 101 – 106.
- 32.Наштаева А.В., Измерение краевого угла методом сидячей капли на вертикальной поверхности/ А.В. Наштаева, К.С. Мельникова, К.С. Просвирнина, С.А. Наштаева//, Фундаментальные исследования. – 2015. № 2. С. 2855 – 2859.
33. ГОСТ 16030 – 70. Отверстия сквозные квадратные и продолговатые под крепёжные детали. – Москва: Изд-во «Стандартинформ», 2019. – 3 с.
- 34.Карталис Н.И., Пронин В.А., Особенности проектирования корпусных деталей типовых конструкций редукторов: Учеб. – метод. пособие./ Н.И. Карталис, В.А. Пронин – СПб.: НИУ ИХиБТ, 2013. – 46 с.

35. Анурьев В.И., Справочник конструктора – машиностроителя: В 3 т. Т. 1. – 8 – е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.: ил.
36. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании/ Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова //Обработка металлов. – 2011. – №3(52). – С. – 11 – 17.
37. Рахимьянов Х.М. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании / Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. – Н.: НГТУ, 2009. – 14 с., ил.
38. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Взаимосвязь кинематических и деформационных параметров ультразвукового пластического деформирования с геометрическими параметрами формируемого микрорельефа / Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – №2(134). – С. – 16 – 19.
39. Формирование микрогеометрии поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании металлов и сплавов / Ю. С. Семенова, А. П. Лихачев // 1 Annual Russian national conference on nanotechnologies, nanomaterials and microsystems technologies, NMST–2016 = 1 ежегодная Российская национальная конференция с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике, НМСТ–2016: conf. proc., Novosibirsk, Sedova Zaimka, 26–29 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – P. 102-106.
40. Surface preparation of machine parts and instruments by ultrasonic impact treatment before coating / Х. М. Рахимьянов, Ю. В. Никитин, Ю. С. Семенова // The Third International Forum on Strategic Technologies, June 23-29, 2008. Novosibirsk-Tomsk, Russia с.108-114

41. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрин Н.И., Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования / Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец, Н.И. Сентюрин; под. Ред. Н.Ф. Котеленец – М.: Издательский центр «Академия», 2015. - 304 с., ил.
42. Б.В. Лосиков, Н.Г. Пучков, Б. А. Энглин. Основы применения нефтепродуктов - 2-е изд., доп. и перераб. - Москва: Гостоптехиздат, 1959. - 567 с. : ил.
43. Лужнов Ю.М., Калачев Ю.Н., Александров В.Д., Смазка и смазочные материалы (трибологические аспекты смазки) / Ю.М. Лужнов, Ю.Н. Калачев, В.Д. Александров, – М.: МАДИ, 2019. – 40 с., ил.
44. Беркович И.И., Громаковский Д.Г., Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г., Громаковский – Самара., Издательство «Самарский государственный технический университет». 2000. – 268 с. ил.
45. Троцкий С.Н., Топлива, смазочные материалы и технические жидкости для строительных машин/ С.Н. Троцкий – М.: «Издательство Ассоциации строительных вузов», 2010. – 96 с. ил.
46. Ross, O.N. (2000) Optical Remote Sensing of Rainfall Microstructures, Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik, Diplom Thesis, 134pp.
47. Березин К. Г., Годлевский В.А. Построение Безразмерного критерия для оценки антизадирных свойств поверхностно – активных смазочных материалов/ К. Г. Березин, В.А. Годлевский, Б.Р. Киселев, А.О. Магницкий//, Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. – 2010. № 4(24). С. 67-71.
48. ГОСТ ISO 7886 – 1 – 2011 Шприцы инъекционные
49. ГОСТ ISO 7864 – 2011 Иглы инъекционные
50. Cutnell, John D.; Kenneth W. Johnson (2006). Essentials of Physics. Wiley Publishing