

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

(наименование кафедры)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Материаловедение и технологии наноматериалов и наносистем

(направленность (профиль)/специализация)

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: «Исследование влияния технологических остаточных напряжений на сопротивление материала упругопластической деформации»

Студент

П.В. Попова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Г.В. Мураткин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

Т.С. Анисифорова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

А.Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор, Г.В. Клевцов

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

(личная подпись)

«    »      20     г.

Тольятти 2019

## АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, литературного обзора, методической, а так же экспериментальной частей, и содержит 64 страницы, из них 19 рисунков, 5 таблиц и 36 источников.

Первый раздел посвящен литературному обзору проблемы повышения износостойкости элементов подшипников скольжения, изучены закономерности изнашивания деталей и выявлена возможность снижения интенсивности изнашивания деталей за счет управления их напряженным состоянием при обработке деталей методами поверхностного пластического деформирования.

Во втором разделе проведены аналитические исследования напряженного состояния под воздействие инструмента при обработке ППД и представлена математическая модель расчёта оптимальных режимов поверхностного пластического деформирования, а так же параметров эпюры начальных напряжений. Представлены закономерности влияния технологических параметров отделочно-упрочняющей обработки на напряженное состояние поверхностного слоя изделий.

Третий раздел посвящен экспериментальным исследованиям, где рассмотрено влияние напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям, методом индентирования.

## **ABSTRACT**

The topic of the given graduation work is Investigation of technological residual stresses effect on the resistance of an elastoplastic deformation material.

This graduation work is about the studies of the residual stresses effect on the material's parts resistance of elastoplastic deformation.

The graduation work may be divided into several logically connected parts which are literary review, methodical part and experimental part.

In the first chapter much attention is given to the problem of increasing the wear resistance of sliding bearing elements. As well as we study the role of residual stresses in reducing wear rate.

The second chapter gives the mathematical models that allow calculating the optimal parameters for machining parts by the method of surface plastic deformation and establishing the initial stress distribution. It also presents the experimental dependency which describes the effect of the technological processing parameters on the stress state of the surface layer of products.

In the experimental part we report the research results conducted to determine the positive impact of compression stresses on the resistance of elastoplastic deformations.

The graduation project consists of an explanatory note on 64 pages, introduction, including 19 figures, 5 tables, the list of 36 references.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 Технологическое обеспечение высокой надежности и долговечности деталей ответственного назначения .....	9
1.1 Проблема повышения износостойкости деталей в машиностроении .....	9
1.2 Анализ работы подшипников скольжения шейки коленчатого вала - вкладыши .....	17
1.3 Повышение сопротивления материала деталей упругопластическим деформациям за счет формирования оптимального напряженного состояния поверхностного слоя шатунных и коренных шеек .....	21
1.4 Релаксационная стойкость остаточных напряжений в изделиях .....	30
1.5 Поверхностное пластическое деформирование, как способ повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей .....	34
2 Методические положения проведения исследований .....	38
2.1 Управление напряженным состоянием .....	38
2.2 Методика управления напряженным состоянием образцов .....	40
2.3 Методика расчета параметров эпюры начальных напряжений и ее интегральной характеристики .....	43
2.4 Методика исследования влияния остаточных напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям .....	50
3 Результаты исследований влияния остаточных напряжений на сопротивление материала упругопластическим деформациям .....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	59
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	60

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение технико-экономических качеств автомобилей привело к интенсификации эксплуатационных процессов их узлов и агрегатов и, как следствие, быстрому изнашиванию деталей. В этой связи расходы на поддержание работоспособности автомобилей возросли в 2,5 раза, большая часть которых приходится на устранение отказов наиболее нагруженных изделий ответственного назначения.

Среди важнейших проблем, стоящих в настоящее время перед современным автомобилестроением, одно из первых мест занимает проблема повышения эксплуатационной надежности автотранспортных средств, которая зависит от ограниченного числа высоконагруженных ответственных деталей. Огромный вклад в изучение и разработку основных принципов обеспечения работоспособности автомобилей и других машин в процессе эксплуатации на основе исследования их надежности внесли авторы: Ф.Н. Авдонькин, М.Н. Бедняк, Г.В. Веденяпин, И.Н. Величкин, С.В. Венцель, Д.Н. Гаркунов, Б.В. Гольд, Н.Я. Говорущенко, М.А. Григорьев, И.Б. Гурвич, В.А. Долецкий, И.Е. Дюмин, Н.С. Ждановский, Б.П. Загородских, Е.А. и другие.

Коленчатый вал является одной из самых ответственных и конструктивно сложных деталей кривошипно-шатунного механизма, которые отвечают за работу двигателя и определяют его надежность и долговечность. Срок службы коленчатого вала зависит от условий его работы и качества изготовления, определяющего его эксплуатационные свойства в условиях жидкостного трения. Надежность коленчатых валов может оцениваться техническим (средним) ресурсом, т.е. безотказной работой до капитального ремонта. Чем надежнее коленчатый вал, тем больше ресурс двигателя и тем меньше затрат у автотранспортных предприятий на ликвидацию отказов и прочие виды ремонта. Однако в процессе эксплуатации автотранспортных средств достаточно часто надежность коленчатых валов является недостаточной из-за нарушения закономерного

развития процессов изнашивания поверхностного слоя. При этом их долговечность составляет в среднем всего лишь 80% от ресурса двигателей, что приводит к большим затратам автотранспортных предприятий. Поэтому повышение эксплуатационной надежности и долговечности коленчатых валов в настоящее время является весьма актуальной задачей.

Качество и, соответственно, эксплуатационные свойства коленчатых валов обеспечивается, прежде всего, за счет высокой точности, шероховатости рабочих поверхностей шатунных и коренных шеек и прочности материала их поверхностного слоя. Одним из путей дальнейшего повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей шеек валов является путь формирования технологическими методами благоприятных параметров качества поверхностного слоя. Эти параметры качества формируются на протяжении всего технологического процесса изготовления валов. Но особо важная роль в их достижении принадлежит, безусловно, финишной обработке. При этом различные методы финишной обработки формируют различные по качеству и свойствам поверхностный слой изделий.

Применение в качестве финишной обработки шлифования, хонингования, полирования позволяет снизить шероховатость рабочих поверхностей деталей, но не позволяет достичь оптимального качества их поверхностного слоя. Оно обеспечивается поверхностным пластическим деформированием (ППД), при котором не образуется стружка, но зато происходит пластическое деформирование материала поверхностного слоя с образованием тонкой структуры и формированием остаточных напряжений сжатия.

На сегодняшний день влияние шероховатости поверхности и упрочнения материала на качество рабочих поверхностей шеек коленчатых валов хорошо изучено и определена их ведущая роль в повышении износостойкости изделий. Однако возможность повышения свойств, определяющих длительность работы шеек коленчатых валов, за счет их

дальнейшего улучшения технологическими методами практически полностью исчерпана. В связи с этим поиск иных путей повышения эксплуатационных свойств является очень актуальной.

Эффективное решение вопросов повышения качества коленчатых валов и, в конечном счете, их надежности и долговечности невозможно без знаний причин возникновения отказов и закономерностей изменения их технического состояния в процессе эксплуатации. Эта информация необходима не только для определения оптимальных параметров качества изделий, но и для разработки оптимальной структуры технологического процесса изготовления коленчатых валов, способного отдалить момент наступления их предельного состояния.

Одним из параметров качества материала поверхностного слоя, определяющего его физико-механические свойства, являются технологические остаточные напряжения. Так, в отношении влияния технологических остаточных напряжений на износостойкость изделий у исследователей до сих пор не сложилось единого мнения. Это можно объяснить тем, что при изучении влияния остаточных напряжений на величину износа в качестве их характеристики рассматривались либо максимальное значение остаточных напряжений, либо глубина их залегания, которые не дают полной информации об уровне остаточных напряжений. Кроме того, остаточные напряжения в основном оказывают влияние на износостойкость в случае, когда они сохраняются в изделиях длительное время и когда процесс изнашивания носит усталостный характер. Именно эти обстоятельства не позволили выявить явного позитивного влияния остаточных напряжений на износостойкость. Так или иначе наличие технологических остаточных напряжений в теле изделия в любом случае нарушает закономерность развития упругопластической деформации в материале в процессе нагружения. А поскольку способность материала оказывать сопротивление упругопластическим деформациям является одним из критериев, определяющим эксплуатационные свойства изделий, в том

числе и износостойкость, то именно этот факт и рассматривается в данной выпускной квалификационной работе. Таким образом, целью дипломной работы является повышение сопротивления материала деталей упругопластическим деформациям путем формирования благоприятных остаточных напряжений при обработке ППД.

# **1 Технологическое обеспечение высокой надежности и долговечности деталей ответственного назначения**

## **1.1 Проблема повышения износостойкости деталей в машиностроении**

Неизменной тенденцией современного автомобилестроения является повышение надежности и долговечности конструктивно сложных деталей ответственного назначения, особенно, тех которые лимитируют срок службы агрегатов и машин. Коленчатые валы являются одними из таких деталей, которые отвечают за работу двигателей внутреннего сгорания и определяют их ресурс. Однако в процессе эксплуатации автотранспортных средств достаточно часто эксплуатационная надежность коленчатых валов является недостаточной, а долговечность составляет в среднем всего лишь 80% от ресурса двигателей [1]. Это приводит к большим затратам автотранспортных предприятий на ликвидацию отказов и различные виды ремонта двигателей. Поэтому повышение эксплуатационной надежности и долговечности коленчатых валов в настоящее время является актуальной задачей.

Технологическое обеспечение высокой надежности и долговечности коленчатых валов, прежде всего, основывается на повышении качества поверхностного слоя шатунных и коренных шеек [2, 3], его несущей способности. Поверхностный слой деталей машин является наиболее нагруженным слоем, который подвергается интенсивному силовому воздействию и воздействию технологической среды. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства деталей: износо- и коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и другие. Параметры качества поверхностного слоя изделий, а именно микрорельеф и физико-механические свойства формируются на протяжении всего технологического процесса изготовления валов.

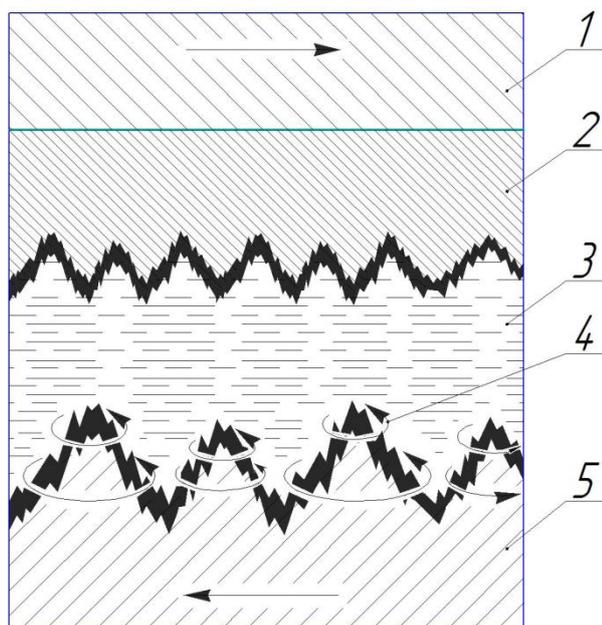
Вопросу повышения эксплуатационных свойств деталей путем обеспечения оптимальных параметров шероховатости поверхности и физико-механических свойств материала поверхностного слоя были посвящены исследования таких авторов, как А.Н. Дальский [4], А.В. Подзей [5], А.А. Маталин [6], А.М. Сулима [7] и другие. Результатом исследований явилось разработка учения о качестве поверхности и поверхностного слоя и создание нового научного и практического направления в науке, направленного на повышение эксплуатационных свойств деталей машин технологическими методами. Развитие учения о качестве поверхности и поверхностного слоя привело к установлению прямых зависимостей между параметрами режима обработки и основными характеристиками качества поверхности и поверхностного слоя.

Следует отметить, что особая роль в формировании параметров шероховатости поверхности и физико-механических свойств материала поверхностного слоя принадлежит финишной операции [8]. При этом различные методы финишной обработки формируют различные по качеству и свойствам поверхностный слой изделий.

В типовом технологическом процессе изготовления коленчатых валов в качестве финишной обработки применяют отделочную операцию полирования поверхностей шатунных и коренных шеек. Ее применение обусловлено условиями эксплуатации, требующими низкой шероховатости рабочих поверхностей.

Если бы на завершающем этапе процесса изготовления коленчатых валов ограничились операцией абразивного шлифования, то это привело к преждевременному выходу из строя подшипников скольжения по следующей причине. Во время эксплуатации отдельные микронеровности шероховатой поверхности, полученной при шлифовании, создают турбулентные завихрения в масляном слое (рисунок 1), которые приводят к разогреву масла и снижению его вязкости. В свою очередь, снижение вязкости масла

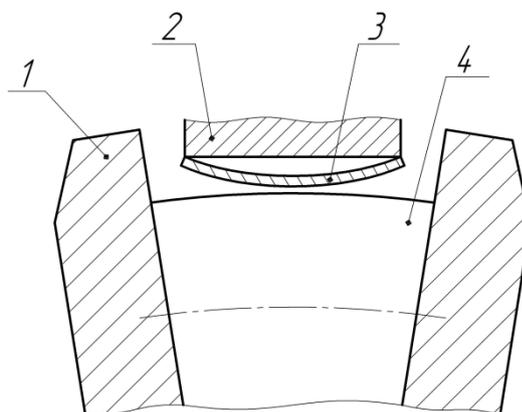
способствует уменьшению гидродоъемной силы, действующей со стороны масляного слоя на вкладыш.



1 –стальная основа вкладыша; 2 –антифрикционный слой; 3 –  
масляный слой; 4 – турбулентные завихрения масла; 5 – шатунная  
шейка

Рисунок 1 – Схема работы подшипника скольжения в условиях  
жидкостного трения

Это сопровождается уменьшением зазора между шейкой вала и вкладышем и, соответственно, снижением толщины масляного слоя. Снижение толщины слоя ухудшает теплоотвод из зоны трения, вследствие чего еще больше усиливается нагрев масла в зазоре и материала сопряженных поверхностей. Повышение температуры в зоне трения инициирует процесс развития остаточных деформаций вкладышей и коленчатого вала, который приводит к изменению характера контактного взаимодействия сопряженных поверхностей подшипника скольжения (рисунок 2).



1 – щека коленчатого вала; 2 – шатун; 3 – вкладыш; 4 – шатунная шейка коленчатого вала

Рисунок 2 – Остаточные деформации изгиба вкладыша и коленчатого вала

Это обстоятельство способствует наступлению режима критического нагружения подшипника, который в большинстве случаев приводит к образованию локального контакта поверхностей трения (рисунок 2) и образованию задиров на шатунной шейке коленчатого вала (рисунок 3).

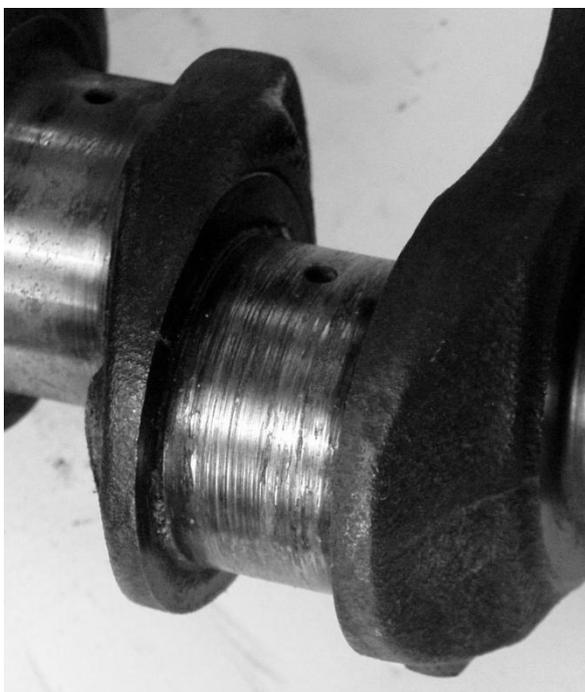


Рисунок 3 – Задир на шатунной шейке коленчатого вала

В результате двигатель внутреннего сгорания машины выходит из строя задолго до выработки его номинального ресурса [9]. Таким образом, отделочная обработка рабочих поверхностей шеек коленчатого вала является необходимым условием для нормальной работы кривошипно-шатунного механизма двигателя. Но операция полирования снижает шероховатость рабочих поверхностей шеек, но не позволяет обеспечить оптимального качества поверхностного слоя.

Проблема повышения износостойкости ответственных валов приобретает особую значимость, когда допускаемая величина износа рабочих поверхностей составляет всего лишь несколько микрометров, как, например, у поверхностей шеек коленчатого вала. Повышение износостойкости таких поверхностей означает не полное исключение разрушений поверхностного слоя, а лишь ограничение скорости процесса разрушения, которое позволит обеспечить их нормативный ресурс.

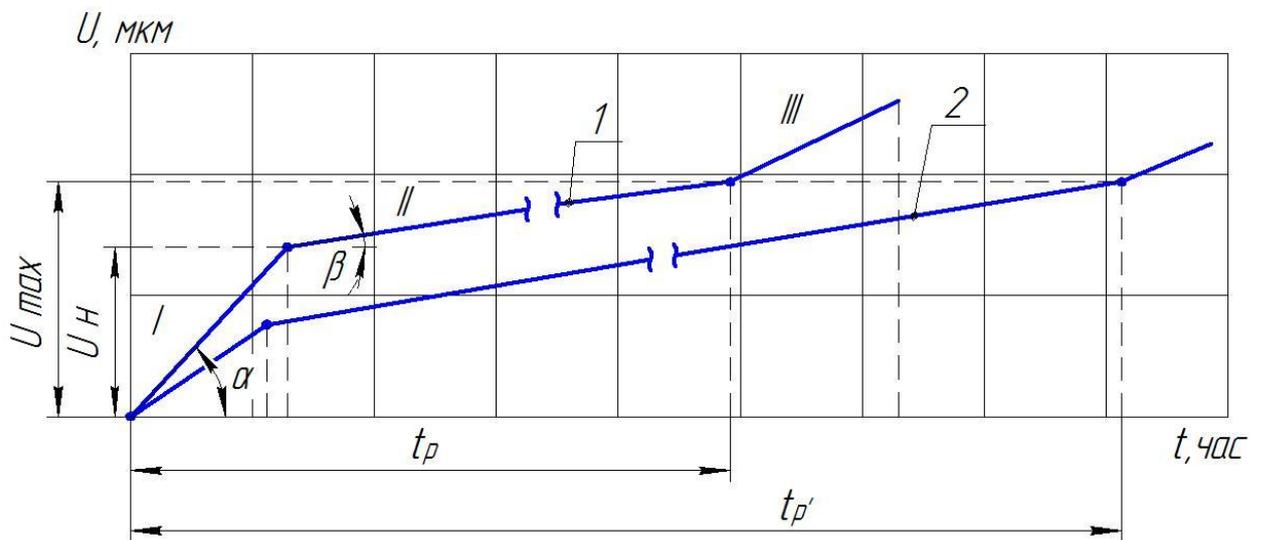
Основой повышения износостойкости ответственных деталей является формирование оптимального поверхностного слоя деталей, который будет оказывать противодействие упругопластическим деформациям, возникающим в процессе трения. Получение требуемого поверхностного слоя осуществляется различными методами обработки, в том числе и методами, применяемыми на финишных этапах изготовления деталей.

Возможность повышения надежности и долговечности ответственных деталей за счет формирования оптимальных параметров качества их поверхностного слоя можно продемонстрировать на примере обобщенной закономерности процесса изнашивания, которая состоит из трех периодов: приработки, нормального и ускоренного изнашивания (рисунок 4).

Процесс приработки, в основе которого лежат сложные механические, физические и химические процессы, во многом определяет общую износостойкость детали [3].

В начале периода приработки фактическая поверхность контакта сопряженных поверхностей составляет лишь небольшую часть от расчетной

величины, так как соприкосновение происходит по вершинам микронеровностей, где развиваются большие удельные давления. Под их действием в местах контакта происходит смятие исходной шероховатости и формирование нового микропрофиля поверхности. Относительное перемещение рабочих поверхностей приводит к еще большему изменению исходной шероховатости из-за срезания и скола вершин микронеровностей. В результате возникает «начальный износ»  $U_H$  поверхностей (рисунок 4, график 1), вследствие которого быстро увеличивается зазор между сопряженными деталями.



I – приработка; II – нормальное изнашивание; III – ускоренное изнашивание; 1 – после изготовления по типовому технологическому процессу; 2 – после изготовления по рациональному технологическому процессу

Рисунок 4 – Графики процесса изнашивания изделий

Интенсивность начального изнашивания обратно пропорциональна площади фактического касания рабочих поверхностей, зависящей от формы единичных микронеровностей и относительной опорной длины микропрофиля поверхности, а также от структуры материала поверхностного слоя и его твердости.

Дальнейший процесс истирания сопровождается увеличением площади фактического контакта поверхностей сопряженных деталей, а, следовательно, снижением удельного давления, которое приводит к уменьшению интенсивности начального изнашивания. Исходная шероховатость, полученная после обработки детали, преобразуется в «эксплуатационную» шероховатость. Подобные изменения также происходят с другими параметрами качества поверхностного слоя изделия.

К концу периода приработки основные эксплуатационные характеристики поверхности, такие как, шероховатость, твердость, структура граничного слоя металла, цельность поверхности приобретают оптимальные значения, соответствующие данным условиям эксплуатации.

В период нормального изнашивания оптимальные эксплуатационные характеристики как бы самоподдерживаются, т.е. изменяясь, они непрерывно воспроизводятся в тех же значениях. Такое положение наблюдается до наступления предельного состояния изделия, которое наступает при предельно допустимом износе  $U_{\max}$ . Собственно его величина и определяет долговечность  $t_p$  изделия. Если после образования предельно допустимого износа эксплуатация детали продолжается, то начинается период ускоренного изнашивания. Этот период характеризуется возникновением динамических нагрузок и лавинообразным образованием различных дефектов и повреждений, приводящих к отказу сопряжения и машины в целом. Поэтому с целью предупреждения аварийных ситуаций стремятся не допускать эксплуатацию машины в условиях ускоренного изнашивания ее комплектующих деталей.

Только рациональный технологический процесс изготовления изделия, способен сформировать у поверхностей изделия такой комплекс характеристик (микропрофиль, твердость, структуру материала и др.), который возникает к концу периода приработки. Это позволяет изделию вступить, почти сразу минуя период приработки (или существенно его сокращая) в работу в режиме нормального изнашивания.

Из рисунка 4 (график 2) видно, что в результате сокращения продолжительности периода приработки и уменьшения начального износа  $U_n$  при прочих неизменных условиях эксплуатации существенным образом возрастает долговечность  $t_p$  детали.

На сегодняшний день влияние шероховатости поверхности и упрочнения материала на несущую способность поверхностного слоя деталей хорошо изучено и определена их ведущая роль в повышении эксплуатационных свойств изделий, в частности и в повышении износостойкости. Однако возможность дальнейшего повышения износостойкости за счет необходимых параметров микрогеометрии и упрочнения технологическими методами практически полностью исчерпана.

Основным процессом, возникающим при трении материалов и приводящим к износу, является упругопластическая деформация, возникающая при взаимодействиях микрорельефов поверхностей. Этот процесс порождает и сопровождается множеством производных физических, химических и механических процессов, протекающих на поверхностях и в поверхностных слоях трущихся тел. Это процессы окисления, теплофизические и коррозионно-механические процессы, усталостное разрушение, и т. д. Следовательно, одним из критериев снижения интенсивности изнашивания, является повышение сопротивления материала деталей, возникающим упругопластическим деформациям. Использование физического состояния материала поверхностного слоя деталей, позволит решить данную проблему. Напряженное состояние материала изделий при определенных условиях позволит повысить несущую способность их поверхностного слоя.

## **1.2 Анализ работы подшипников скольжения шейки коленчатого вала - вкладыши**

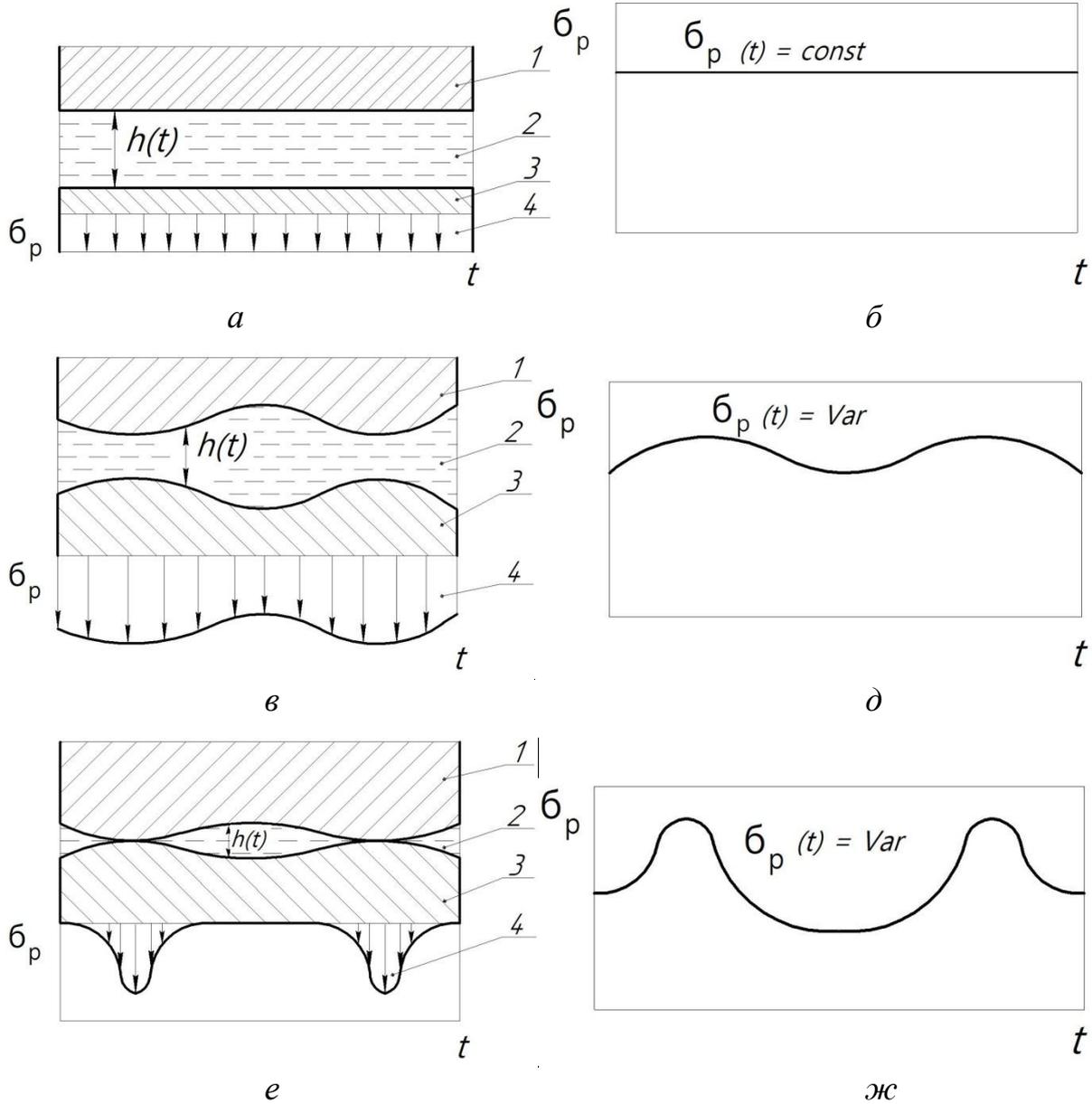
Причиной большинства закономерных отказов автомобилей в процессе эксплуатации является изнашивание рабочих поверхностей ответственных деталей, какими являются коленчатые валы. Поэтому для того, чтобы обеспечить необходимые эксплуатационные свойства деталей необходимо проанализировать закономерности изнашивания элементов (шейки коленчатого вала – вкладыши) трибосопряжения в процессе работы двигателя. В первую очередь следует изучить физическую природу процессов изнашивания трибосопряжения и определить причины нарушения закономерного развития этих процессов. Именно эти знания позволят использовать дополнительные возможности параметров качества поверхностного слоя для решения проблемы износостойкости коленчатых валов, которая тесно связана с проблемой сопротивления поверхностного слоя деталей упругопластическим деформациям, возникающим при трении.

Анализ эксплуатации двигателей показывает, что сроки проведения ремонтов определяются техническим состоянием деталей кривошипно-шатунного механизма, среди которых наиболее нагруженными и быстро изнашиваемыми являются подшипники скольжения коленчатого вала [10, 11].

Характерным условием работы подшипников скольжения, является наличие смазки между поверхностями антифрикционного слоя вкладышей и шеек коленчатых валов. Для нормальной работы кривошипно-шатунного механизма требуется, чтобы толщина масляного слоя между поверхностями элементов трибосопряжения не была меньше допустимой  $h > 15$  мкм [12].

При работе двигателя в штатном режиме, подшипники скольжения работают в условиях жидкостного трения, для которого характерна величина масляного слоя не менее 20 мкм. При жидкостном трении каждый участок поверхностей элементов трибосопряжения нагружен постоянным давлением

(рисунок 5, а, б), которое остается неизменным при относительном перемещении этих поверхностей. Для таких условий трения свойственны отсутствие физического контакта поверхностей трения и минимальная интенсивность изнашивания.



1 – антифрикционный слой вкладыша; 2 – масляный слой; 3 – поверхностный слой шейки; 4 – рабочие напряжения

Рисунок 5 – Схемы нагружения элементов трибосопряжения коленчатого вала и графики рабочих напряжений, действующих на поверхность шатунной шейки

В этих условиях коленчатые валы практически полностью реализуют заложенный в них ресурсный потенциал, обусловленный сформированными в процессе изготовления оптимальными параметрами шероховатости поверхности и упрочнения материала поверхностного слоя шатунных и коренных шеек.

Но на практике из-за интенсификации эксплуатационных процессов (увеличение скоростного режима и мощностных характеристик двигателей, повышение рабочих температур и давления) достаточно часто происходит изменение условий работы подшипников скольжения, сопровождающееся наложением дополнительных динамических нагрузок на основные нагрузки, которое приводит к пульсации давления масла в зоне трения. Это вызывает колебания толщины масляного слоя, рост температуры в зоне трения и, как следствие, проседание вкладыша. Таким образом, происходит нарушение закономерного развития процесса изнашивания при трении скольжения со смазочным материалом и создаются условия для полужидкостного трения. При таком трении возникают более нагруженные зоны в месте сближения микронеровностей поверхностей элементов трибосопряжения (рисунок 5, в, д). При относительном движении этих поверхностей происходит циклическое изменение уровня рабочих напряжений в каждой отдельной микронеровности поверхностей и создается условие для их усталостного разрушения. По мере повышения температуры масла и проседания вкладыша создается разрыв масляной пленки и возникает непосредственный контакт микронеровностей поверхностей трения (рисунок 5, е, ж). При этом процесс изнашивания элементов трибосопряжения приобретает явно усталостный характер. Развитие усталостного изнашивания сопровождается выкрашиванием материала с рабочих поверхностей шеек. Частицы износа смешиваются с маслом и еще больше ускоряют процесс изнашивания шатунных и коренных шеек коленчатых валов. В результате происходит ухудшение условий нагружения кривошипно-шатунного механизма, которое

в конечном итоге заканчивается преждевременным отказом двигателей внутреннего сгорания.

### **1.3 Повышение сопротивления материала деталей упругопластическим деформациям за счет формирования оптимального напряженного состояния поверхностного слоя шатунных и коренных шеек**

Строение поверхностного слоя любой детали, в том числе и ответственного назначения, резко отличается от основного материала, так как несет на себе результат воздействия технологического процесса обработки. Тонкий поверхностный слой деталей в процессе обработки подвергается сильнейшим тепловым и силовым воздействиям. В результате происходит сдвиг в зернах металла, искажение кристаллической решетки, изменение формы и размеров зерен, которые приводят к повышению твердости и возникновению остаточных напряжений. Это в дальнейшем обуславливает различное поведение материала поверхностного слоя при трении. Именно здесь открываются возможности технологического управления качеством поверхностного слоя через методы и режимы обработки.

В общем случае строение поверхностного слоя состоит из следующих характерных участков (рисунок 6).

1 – слой вторичных структур материала, содержащий оксидные пленки, к которым примыкает аморфный адсорбированный слой пленок влаги, газов и загрязнений;

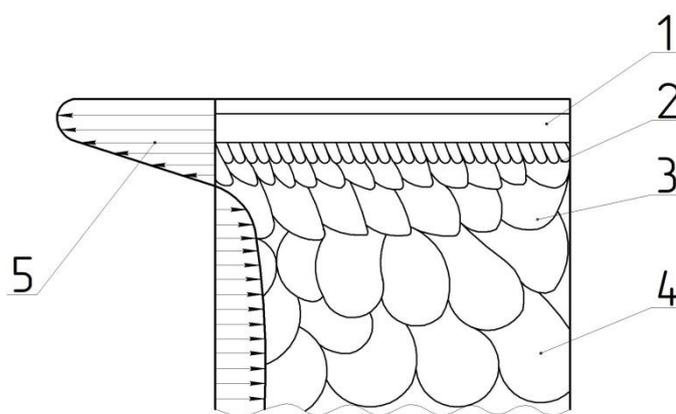
2 – слой материала с сильно деформированной кристаллической решеткой, характеризующийся определенной ориентацией зерен и высокой твердостью;

3 – слой материала с искаженной кристаллической решеткой, имеющий увеличенное число дислокаций и вакансий;

4 – сердцевина детали, состоящая из материала с исходной структурой;

5 – остаточные напряжения в поперечном сечении детали.

Стремление получить поверхностный слой детали с наилучшими эксплуатационными характеристиками привело к применению различных технологических процессов финишной обработки, таких как тонкое шлифование, полирование, абразивная доводка и др. На строение поверхностного слоя изделия, его геометрические и физические параметры оказывает влияние не только вид процесса окончательной обработки, но и режим обработки, который обуславливает сложные процессы формирования микрорельефа, твердости и остаточных напряжений.



1 – слой вторичных структур материала; 2 – слой материала с сильно деформированной кристаллической решеткой; 3 – слой материала с искаженной кристаллической решеткой; 4 – сердцевина детали; 5 – остаточные напряжения в поперечном сечении детали

Рисунок 6 – Схема строения поверхностного слоя детали

Если влияние микрорельефа поверхности и упрочнения материала поверхностного слоя на процесс изнашивания хорошо изучено, то о влиянии остаточных напряжений существуют достаточно противоречивые точки зрения. Так, например, авторы [13] считают, что остаточные напряжения растяжения приводят к повышению усталостного изнашивания. А в работе [14], теоретически обосновано положительное влияние растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое на износостойкость деталей.

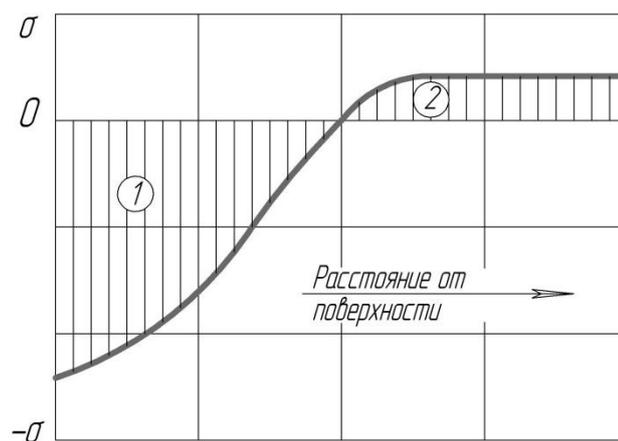
В статьях [15, 16] приводится научно-исследовательское обоснование, что остаточные напряжения, как растяжения, так и сжатия способствуют уменьшению износа. И таких примеров достаточно много. Отсутствие единого мнения у исследователей на данную тему объясняется рядом причин.

Во-первых, остаточные напряжения проявляют себя с положительной стороны, когда процесс изнашивания носит усталостный характер. При других видах изнашивания, остаточные напряжения проявляют себя в меньшей степени.

Во-вторых, в большинстве исследований влияния остаточных напряжений на величину износа, рассматривались максимальное значение остаточных напряжений или глубина их залегания, что является неверным. Указанные характеристики не отражают в полной мере величину внутренней силы от остаточных напряжений.

В-третьих, огромную роль в повышении эксплуатационных свойств за счет остаточных напряжений играет их устойчивость.

Технологические остаточные напряжения наряду с твердостью являются показателем физического состояния материала изделий. Эпюру остаточных напряжений можно разделить на активную и уравнивающую части (рисунок 7), разграничивающиеся в точке, в которой напряжения проходят через ноль. Такой характер распределения остаточных напряжений отвечает уравновешенному напряжённо-деформированному состоянию детали. С физической точки зрения нет никакой разницы между напряжениями в активной части эпюры и напряжениями в уравнивающей части, так как они имеют упругий характер [5].



1 – активная часть; 2 – уравнивающая (реактивная) часть эпюры  
 Рисунок 7– Эпюра остаточных напряжений в поверхностном слое детали

Примечательно, что именно остаточные напряжения в активной части эпюры являются тем активным силовым фактором, который оказывает влияние на эксплуатационные свойства изделий. Это влияние проявляется при воздействии внешних силовых факторов на деталь. Оно может быть значительным или ничтожно малым, при этом может быть позитивным или негативным. Остаточные напряжения могут оказывать позитивное влияние на эксплуатационные свойства изделий в тех случаях, когда повышают прочность материала и его способность оказывать сопротивление внешним разрушающим нагрузкам. Это становится возможным в случае, когда направление остаточных напряжений противоположно направлению напряжений от внешней нагрузки. При такой диспозиции они могут значительно нейтрализовать действие внешней нагрузки. Наличие технологических остаточных напряжений в теле изделия в любом случае нарушает закономерность развития упругопластической деформации в материале в процессе нагружения.

Остаточные напряжения оказывают значительное влияние на долговечность изделий, работающих при циклических нагрузках [17]. В большинстве случаев разрушение деталей, подвергаемых изгибу или кручению, происходит из-за остаточных напряжений растяжения и никогда

не происходит из-за остаточных напряжений сжатия. Поэтому можно констатировать, что остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое детали повышают выносливость металла, а напряжения растяжения, наоборот, понижают предел выносливости. В этой связи там, где экономически целесообразно, надо остаточные напряжения растяжения, образованные в поверхностном слое деталей в результате термической или механической обработки, подавить и сформировать остаточные напряжения сжатия.

Высокая интенсивность пластической деформации, возникающей в процессе обработки, может привести к значительному градиенту технологических остаточных напряжений в поверхностном слое. При этом происходит снижение остаточных напряжений на поверхности детали и сдвиг их максимума в подслоиную область материала детали. Подслоинный максимум остаточных напряжений является сильнейшим концентратором напряжений, который существенным образом снижает сопротивление материала детали усталости, фреттингстойкости и др.

Несмотря на очевидную значимость технологических остаточных напряжений для эксплуатационных свойств изделий, ни один регламент не устанавливает каких-либо требований к уровню и знаку остаточных напряжений в изделиях, и тем более не регламентирует характер их распределения (градиент, асимметричность распределения в сечении, смещение максимума напряжений в глубину слоя и др.). А именно от этих параметров распределения напряжений зависят эксплуатационные свойства изделий.

Влияние технологических остаточных напряжений на свойства деталей зависит от их устойчивости во время работы изделий. В процессе эксплуатации происходит наложение напряжений от рабочей нагрузки на технологические остаточные напряжения. Это наложение напряжений может быть двоякого рода. Если результирующее напряжение от их совместного действия не превышает предел упругости материала, то остается в силе

принцип алгебраической суперпозиции [5] и остаточные напряжения сохраняются неизменными в материале детали в течение длительного времени. В этом случае их влияние на эксплуатационные свойства изделий будет значительным. Если результирующее напряжение будет превышать предел текучести материала, то наложение напряжений от рабочей нагрузки на технологические остаточные напряжения вызывает пластическое течение материала. Пластическая деформация приводит к снятию остаточных напряжений, несмотря на то, что они в определенной мере оказывают ей сопротивление. В этом случае их влияние на эксплуатационные свойства изделий будет малозаметным.

Величина внутренней силы, обусловленной остаточными напряжениями, зависит от интегральной характеристики  $P_n$  их эпюры. Интегральная характеристика  $P_n$  представляет собой вектор, прикладываемый в центре тяжести эпюры и по величине равный её площади. Показатель  $P_n$  учитывает уровень и глубину распространения остаточных напряжений в поперечном сечении детали, не раскрывая порой сложный характер их распределения. Интегральный показатель  $P_n$  с одной стороны характеризует способность остаточных напряжений оказывать сопротивление внешним нагрузкам, а с другой – влияние технологических параметров процесса обработки на напряжённое состояние детали. Оценить это влияние можно при помощи экспериментальной зависимости

$$P_n = C_0 x_1^\alpha \cdot x_2^\beta \cdot x_3^\gamma \cdot \dots, \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – независимые технологические параметры режима обработки;  $C_0, \alpha, \beta, \gamma$  – коэффициенты регрессии.

Из сказанного следует заключить, что способность управлять напряжённым состоянием деталей в ходе технологических процессов обработки и умело использовать его в зависимости от условий нагружения является основой повышения эксплуатационной надежности и долговечности изделий.

В основном вид технологической обработки определяет величину, знак и характер распределения технологических остаточных напряжений в объёме изделия. Но особое внимание на возможность управления напряжённым состоянием за счёт условий проведения обработки обращал проф. Д. Д. Папшев [18]. Так, в значительной мере можно изменить напряжённое состояние детали за счёт упругой деформации заготовки перед обработкой и создания предварительных напряжений.

Под остаточными напряжениями следует понимать уравновешенные напряжения в теле детали после освобождения ее от всех внешних связей и воздействий. В основе возникновения остаточных напряжений лежат необратимые объемные изменения в материале, которые вызываются следующими причинами:

- 1) неоднородной по сечению детали пластической деформацией материала;
- 2) неравномерной по сечению детали термопластической деформацией материала;
- 3) неравномерным по сечению изделия процессом структурно-фазовых превращений в материале, возникающим при нагреве и охлаждении.

По представлению физики твердого тела, любые остаточные напряжения в металле, независимо от причин их возникновения, являются следствием искажения кристаллической решетки [19,20].

В общем случае напряжённость детали можно представить в виде трёх взаимно перпендикулярных составляющих осевых  $\sigma_n^o$ , тангенциальных  $\sigma_n^t$  и радиальных  $\sigma_n^r$  остаточных напряжений первого рода (рисунок 8).

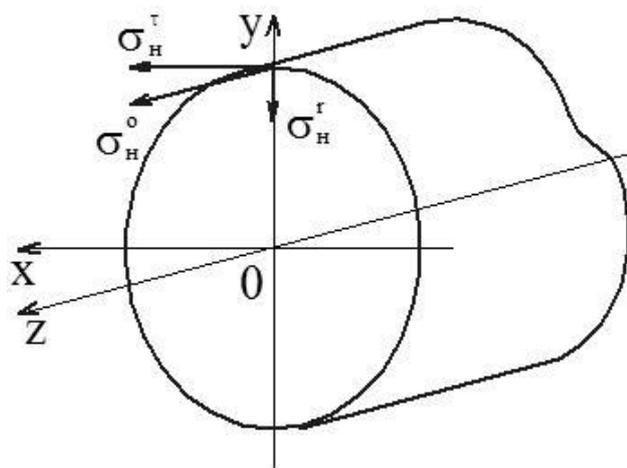


Рисунок 8 – Схема ориентации составляющих остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрической детали

Ориентация этих составляющих связана с направлением векторов формообразующих движений при механической обработке. В дальнейшем будем рассматривать только напряжения первого рода, так как именно они оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей.

Если рассматривать действие остаточных напряжений, как действие внутренней силы, величина которой определяется площадью активной части эпюры остаточных напряжений, включающей в себя величину и глубину их залегания, а направление – знаком остаточных напряжений, то становится очевидной возможность повышения износостойкости путём формирования определённой величины и знака остаточных напряжений при изготовлении детали. Такая возможность реализуется, когда остаточные напряжения в поверхностном слое изделий остаются неизменными длительное время. Повышение эксплуатационных свойств ответственных деталей за счет остаточных напряжений основано на их возможности противодействовать деформации, возникающей при полужидкостном трении.

Анализ литературных источников [21] показал, что наиболее эффективным методом управления напряженным состоянием деталей является обработка ППД, так как она не вносит изменений в эпюру

наследственных остаточных напряжений, связанных с удалением материала поверхностного слоя.

#### 1.4 Релаксационная стойкость остаточных напряжений в изделиях

Технологическое обеспечение высоких эксплуатационных свойств деталей невозможно без знаний закономерностей изменения их напряженного состояния в процессе эксплуатации. Эта информация, необходима, прежде всего, для выбора рационального метода финишной обработки деталей, для максимального продления срока службы изделий.

Изменение напряженного состояния деталей в процессе эксплуатации является результатом, как правило, структурно-фазовых превращений, деформационного старения неустойчивых структур, неоднородной пластической деформации от действия внешних нагрузок и неравномерной пластической деформации, возникающей под действием остаточных напряжений. Все перечисленные факторы являются предпосылками для образования релаксации напряжений и изменения механических свойств материала. Под релаксацией напряжения, согласно [22], понимают процесс перехода из неравновесного состояния в состояние термодинамического равновесия, который сопровождается снижением напряжений в деталях.

По мнению авторов Борздыка и Подзей [23], релаксация напряжений может быть результатом как сдвигово-дислокационных, так и диффузионных процессов. Процессы первого типа характерны для многих металлов, при этом установлено, что релаксация, протекающая путем сдвигово-дислокационного механизма, развивается в первую очередь по поверхностям раздела, то есть на границах зерен, блоков, вторичных фаз и по плоскостям скольжения, в которых произошел сдвиг (пограничная релаксация). Процессы второго типа связаны с перемещением отдельных атомов у границ зерен и по всему объему (объемная релаксация).

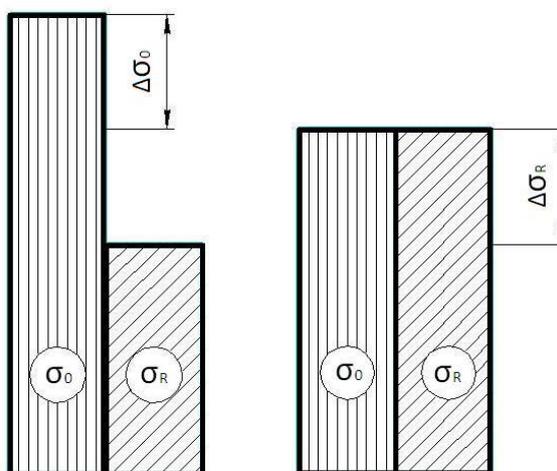
На преобладающее проявление одного из механизма релаксации влияет рабочая температура и уровень действующих напряжений в деталях. Так, например, при низкотемпературной релаксации, температурный порог которой соответствует значениям менее  $0,25T_{пл}$ , доминирующим механизмом

релаксации является дислокационный. В этом случае пластическая деформация накапливается за счет скольжения дислокаций по внутрикристаллическим плоскостям сдвигов. Активная фаза низкотемпературной релаксации протекает наиболее интенсивно в первое время (в течение 20-30 суток) с последующим монотонным затуханием во времени по экспоненциальному закону [24,25].

Время и скорость протекания релаксационных процессов главным образом зависят от действия внутренних (химический и структурно-фазовый составы, физико-механические свойства и напряженное состояние) и внешних (условия эксплуатации) факторов. Стоит отметить что, релаксационные процессы, под действием внутренним и внешних факторов, начинаются в наиболее нагруженных участках поверхности изделий, то есть в тех, где имеются максимальные напряжения. При этом установлено, что величина релаксации технологических остаточных напряжений сжатия, зачастую, меньше, чем остаточных напряжений растяжения. Так, например, в исследованиях Коцюбинского [26], показано, что в чугунных отливках с равными по величине остаточными напряжениями, при процессе релаксации происходит снижение напряжений растяжения на 2,5%, а напряжений сжатия на 0,8 %. Данные расхождения, как объясняет автор, обусловлены эффектом неравнопрочности материала, который вызван различием механических свойств у металлов при растяжении и сжатии.

В работе [27], представлена принципиальная схема (рисунок 9), описывающая процессы релаксации напряжений. Так, возникающая при процессе релаксации пластическая деформация приводит к снижению уровня остаточных напряжений и повышению релаксационной стойкости за счет упрочнения материала. Под релаксационной стойкостью будем понимать максимальное напряжение, которое не вызывает в материале пластическую деформацию. При достижении предела релаксационной стойкости, а именно при такой величине релаксации, при которой остаточные напряжения в материале не могут вызвать в нем дальнейшую пластическую деформацию,

релаксационные процессы прекращаются. Поскольку остаточные напряжения сжатия являются необходимым условием для технологического обеспечения усталостной прочности деталей, то очевидно, что их снижение приведет к ухудшению эксплуатационных свойств. Следовательно, для обеспечения необходимых свойств, определяющих длительность рабочего ресурса и надежность изделий, необходимо при обработке обеспечить устойчивость остаточных напряжений в деталях.



$\Delta\sigma_0$  – часть остаточных напряжений, которые релаксируют в результате пластической деформации;  $\Delta\sigma_R$  – часть предела релаксационной стойкости, приобретенная металлом в результате упрочнения

Рисунок 9 – Принципиальная схема изменений остаточных напряжений  $\sigma_0$  и предела релаксационной стойкости  $\sigma_R$  металла с течением времени

Так, устойчивости остаточных напряжений в поверхностном слое изделий способствуют уменьшение размеров зерна и частиц дисперсной фазы, увеличению угла их разориентировки, равномерного распределения дисперсных частиц в объеме металла, то есть повышению релаксационной стойкости способствуют все факторы повышающие прочность металла. При особо высоких требованиях к изделиям релаксационную стойкость можно дополнительно повысить за счет остаточных напряжений, которые во время

эксплуатации будут противодействовать внешним силовым факторам, и снижать пластическую деформацию.

Релаксационную стойкость изделий можно значительно повысить, используя предложенные ранее методы поверхностного пластического деформирования. При данных методах устойчивость напряжений достигается за счет формирования тонкой структуры с большим числом равномерно распределенных внутренних барьеров, препятствующих движению дислокаций [28]. Причем эффективность обработки ППД возрастает по мере увеличения интенсивности пластической деформации в зоне оптимального режима поверхностного упрочнения [29].

## **1.5 Поверхностное пластическое деформирование, как способ повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей**

Согласно анализу источников [30] было выявлено, что поверхностное упрочнение с присущими ему остаточными напряжениями сжатия при обработке деталей ППД повышает сопротивление пластической деформации во время эксплуатации изделий, в связи с этим ослабляется тенденция к образованию и развитию усталостных трещин, отдалается момент усталостного выкрашивания материала поверхностного слоя, увеличивается сопротивление абразивному изнашиванию. Кроме того, обработка ППД затрудняет проникновение поверхностно-активных веществ, находящихся в технологических средах, внутрь материала деталей, что способствует снижению эффекта адсорбционной усталости. Применение ППД в качестве финишной обработки позволяет уменьшить шероховатость поверхности, полученную в результате предшествующей механической обработки, и сформировать новый микрорельеф, обладающий низкой истирающей способностью.

Авторы работ [31] отмечают, что особенно эффективно деформационное упрочнение материала при ППД при работе деталей с циклической нагрузкой. Уплотненная поверхностная корка, которая образуется на детали после ППД, препятствует росту усталостных трещин. В результате предел выносливости изделия повышается примерно на 30%.

В работе [32] отмечено, что одним из эффектов ППД является влияние остаточных напряжений в поверхностном слое детали на количество микротрещин. Под воздействием остаточных напряжений сжатия, получаемых при обработке ППД, большое количество микротрещин смыкается и обработанная поверхность становится более цельной. Кроме того, поверхностное деформирование выравнивает физико-механические свойства различных участков обрабатываемой поверхности детали. ППД

также устраняет структурную неоднородность материала поверхностного слоя и структурные концентраторы напряжений в детали вследствие того, что более мягкие структуры наклепываются интенсивнее, чем твердые. Под влиянием ППД остаточные напряжения растяжения в детали, сформированные предшествующей обработкой, подавляются вновь созданными остаточными напряжениями сжатия и весь материал поверхностного слоя становится как бы равнонапряженным.

В исследованиях Н.Д. Папшевой [33] показано, что деформационное упрочнение методами ППД существенно замедляет релаксационные процессы остаточных напряжений и наклепа. Релаксационная стойкость материала, отмечает автор, повышается вследствие интенсивного дробления его зерен при ППД. С увеличением усилия деформирования происходит снижение степени релаксации остаточных напряжений и наклепа после ППД. Проведя сравнительный анализ автор приходит к выводу: релаксация остаточных напряжений и наклепа происходит более интенсивно у шлифованных образцов, чем у обработанных ППД.

Авторы работы [34], проанализировав влияние обработки ППД на эксплуатационные свойства изделий, приходят к заключению, что применение ППД в качестве финишной операции является решающим фактором повышения надежности и долговечности деталей.

В заключении на основе первой главы можно сделать выводы:

1. Подшипники скольжения коленчатого вала преимущественно работают в условиях жидкостного трения, но на практике из-за интенсификации эксплуатационных процессов довольно часто происходит изменение условий эксплуатации, которое приводит к работе трибосопряжений при полужидкостном трении. Что способствует возникновению усталостного изнашивания поверхностей трения.

2. Способность материала детали оказывать сопротивление упругопластическим деформациям, возникающим при трении, во многом зависит от состояния и несущей способности поверхностного слоя. Остаточные напряжения наряду с шероховатостью и твердостью оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей.

3. При рассмотрении влияния остаточных напряжений на процесс изнашивания необходимо учитывать условия эксплуатации деталей. Так как остаточные напряжения оказывают положительное влияние на эксплуатационные свойства при усталостном изнашивании и когда детали работают в упругой области деформации.

4. Обработка методами ППД наиболее подходит для формирования благоприятного напряженного состояния изделий с целью повышения их износостойкости.

5. С помощью операции ППД на финишном этапе изготовления деталей, за счет подбора рациональных параметров режима обработки можно создавать оптимальные параметры качества поверхности, а именно шероховатость с минимальной высотой микронеровностей и увеличенным радиусом их закругления, а также дополнительно увеличить твердость материала поверхностного слоя, привести в нем благоприятные тангенциальные остаточные напряжения сжатия. Это позволит минимизировать период приработки и максимально сократить величину износа коленчатых валов.

Исходя из изложенных выше выводов, для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ процесса формирования остаточных напряжений в изделиях выбранным технологическим методом;
2. Исследовать влияние технологических параметров режима обработки на процесс формирования остаточных напряжений;
3. Изучить методику расчета остаточных напряжений;
4. Провести исследование влияния технологических остаточных напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям.

## 2 Методические положения проведения исследований

### 2.1 Управление напряженным состоянием

Напряженное состояние (величина, знак и характер распределения остаточных напряжений) в поверхностном слое изделий, является важнейшим внутренним фактором, обуславливающим их способность оказывать противодействие упругопластическим деформациям, а, следовательно, и определяющим интенсивность изнашивания [35]. При изготовлении деталей ответственного назначения необходимо целенаправленно формировать напряжённое состояние в зависимости от условий эксплуатации.

При выборе режима упрочняющей обработки необходимо учитывать фактическое напряженное состояние деталей в процессе эксплуатации. Так, для сокращения интенсивности изнашивания деталей трибосопряжения, необходимо стремиться к созданию остаточных напряжения сжатия в поверхностном слое, внутренняя сила которых, будет превышать силу, действующую от внешних нагрузок. Внутренняя сила поверхностного слоя, обусловленная тангенциальными остаточными напряжениями сжатия, способствует «закрытию» усталостных трещин и противодействует сдвиговым деформациям, возникающим при циклическом нагружении деталей. Величина этой силы зависит от интегральной характеристики  $P_n$  их эпюры. Интегральная характеристика  $P_n$  представляет собой вектор, прикладываемый в центре тяжести эпюры и по величине равный её площади. Причем чем больше площадь активной части эпюры напряжений, тем больше поверхностный слой снижает разрушительное действие внешних нагрузок.

В качестве финишной технологической операции для управления напряженного состояния коленчатых валов предлагается использовать метод отделочно-упрочняющего обкатывания.

Управление напряженным состоянием технологическим методом обкатывания осуществляется за счет изменения интенсивности деформации в

зоне контакта деформирующего инструмента и заготовки с помощью подбора оптимальных режимов обработки. Под оптимальными технологическими параметрами обкатывания понимаются такие значения, которые обеспечивают образование необходимого уровня остаточных напряжений.

Основными параметрами режима обкатывания, определяющими эпюру остаточных напряжений является сила прижатия и размер деформирующего инструмента, а так же продольная подача. Так как размер инструмента и продольная подача выбираются согласно рекомендациям предложенными Д.Д. Папшевым [24] и Л.Г. Одинцовым [36], для обеспечения максимальной производительности, то одной из главных задач является выбор оптимальной силы прижатия инструмента.

Во время обкатывания в зоне контакта деформирующего шара и изделия возникает упругопластическая деформация, интенсивность которой определяет уровень и характер распределения остаточных напряжений. Так, выбор силы прижатия деформирующего инструмента должен осуществляться согласно условию, что интенсивность деформации  $\varepsilon_i$ , возникающей в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали должна быть меньше равномерно допустимой деформации  $\varepsilon_p$ , физический смысл которой заключается в том, при напряжениях  $\sigma \ll \sigma_B$  не происходит разрушения материала поверхностного слоя. На основании этого положения были разработаны методика определения деформаций и сил прижатия инструмента и методика расчета параметров эпюры начальных напряжений и ее интегральной характеристики  $P_n$ .

## 2.2 Методика управления напряженным состоянием образцов

Для построения эпюры напряжений, возникающих от поверхностного пластического деформирования, необходимо рассчитать ряд параметров.

1. Определяем равномерно допустимую деформацию:

$$\varepsilon_p = \frac{245}{\text{НД}}, \quad (2)$$

где НД – пластическая твердость материала, определяющаяся по ГОСТ 18835 – 73.

2. Расчет силы прижатия инструмента будет осуществляться по методике Д.Д. Папшева [37].

2.1. Рассчитываем коэффициент стеснения:

$$c = 2,57 - 0,7 \sin \varphi, \quad (3)$$

где  $\sin \varphi$  – деформация, зависящая от угла внедрения индентора  $\varphi$  (рисунок 10), и по величине равная равномерно допустимой деформации

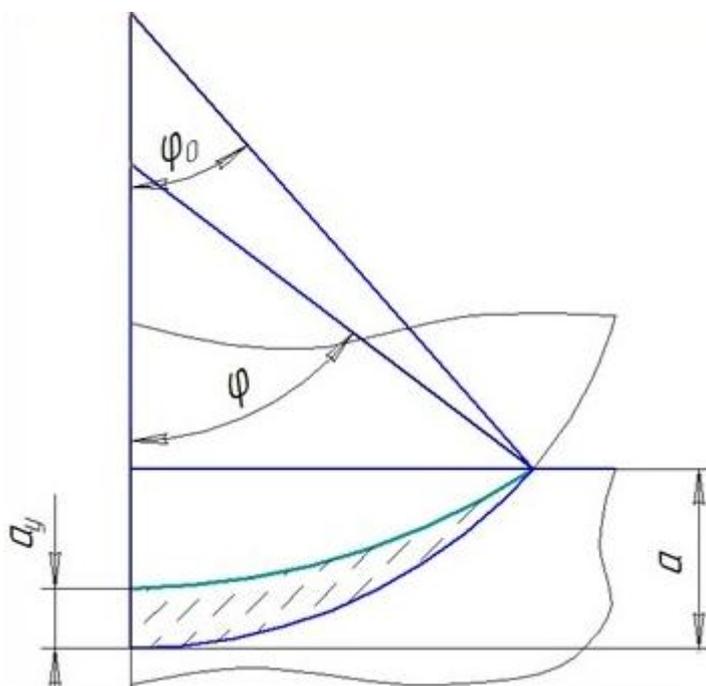


Рисунок 10 – Схема внедрения сферического индентора

2.2. Определяем давление текучести в контакте:

$$q_T = c\sigma_T, \quad (4)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала.

2.3. Производим расчет числа циклов нагружения (повторных циклов) по формуле:

$$N = \frac{a}{S}, \quad (5)$$

$$a = 2r,$$

$$r = R \sin\varphi,$$

где  $S$  – продольная подача;

$a$  – ширина канавки в направлении подачи;

$R$  – радиус деформирующего инструмента.

2.4 Определяем пластическую составляющую полной деформации  $\sin\varphi$

$$\sin\varphi_0 = \sin\varphi - \sin\varphi_y, \quad (6)$$

где  $\sin\varphi_y$  – упругая составляющая полной деформации, определяется по формуле

$$\sin\varphi_y = c \cdot 10^{-5} q \approx 0,00002q, \quad (7)$$

$$q = 0,8HB,$$

$$\sin\varphi_y = \varepsilon_y = \varepsilon_T$$

где  $q$  – среднее давление в контакте;

$\sin\varphi_0$  – пластическая составляющая полной деформации ( $\sin\varphi_0 = \varepsilon_{ост}$ , где  $\varepsilon_{ост}$  – остаточная деформация).

В результате повторного нагружения происходит изменение механических свойств материала. Данное изменение выражается через коэффициент увеличения давления текучести материала

$$q_T = 1 + K_H a_y N^t \sin \varphi_0^t, \quad (8)$$

где  $t, \tau$  – коэффициенты зависящие от материала;

$K_H$  – эмпирический коэффициент нагружения, показывающий какая доля упрочнения материала зависит от  $\sin \varphi$  и  $N$ . Данная величина лежит в пределах от 0,32 до 0,46. Для обкатывания, данный коэффициент увеличивается с уменьшением силы прижатия инструмента;

$a_y$  – коэффициент упрочнения, зависящий от способности материала в упрочнению. Данный коэффициент определяется по стандартным механическим характеристикам материала;

$$a_y = \frac{\frac{\sigma_B}{\sigma_T} (1 + e_k) - 1}{e_k}, \quad (9)$$

где  $e_k$  – истинная (логарифмическая) деформация при растяжении, формула которой представлена ниже

$$e_k = \frac{1}{1 - \psi_k}, \quad (10)$$

где  $\psi_k$  – относительное сужение образца.

Произведение коэффициентов  $K_H$  и  $a_y$  представляет собой касательный модуль, изменяющийся по мере упрочнения.

2.5 Далее определяем среднее давление в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали

$$q = q_T (1 + E_k N^t \sin \varphi_0^t) \quad (11)$$

2.6 Определяем ориентировочную силу прижатия к инструменту

$$P = \pi q R^2 \sin^2 \varphi \quad (12)$$

Стоит отметить, что данное выражение не учитывает исходную шероховатость заготовки, при увеличении шероховатости возрастает среднее давление в контакте инструмента и заготовки.

### 2.3 Методика расчета параметров эпюры начальных напряжений и ее интегральной характеристики

1. Определяем предел текучести  $\sigma_T^*$  материала, увеличенного в результате упрочнения при повторных нагружениях индентором в процессе обработки

$$\sigma_T^* = \sigma_T \left( 1 + K_H a_y N^T \varepsilon_p - \varepsilon_y \right)^t \quad (13)$$

2. Определяем деформацию текучести  $\varepsilon_T^*$ , которая соответствует  $\sigma_T^*$

$$\varepsilon_T^* = \varepsilon_T \left( 1 + K_H a_y N^T \sin \varphi_0 \right)^t \quad (14)$$

где  $\varepsilon_T = \varepsilon_y$ .

3. Рассчитываем напряжение на поверхности

$$\sigma_0^{max} = \sigma_T^* + E_k \left( \varepsilon_p - \varepsilon_T^* \right), \quad (15)$$

где  $E_k$  – касательный модуль (характеристика эпюры в упругопластической области деформации).

4. Рассчитываем глубину упруго и пластически деформированных слоев. Глубина пластически деформированного слоя определяется по формуле И.В. Кудрявцева [38], учитывающей кривизну индентора

$$a_s = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}},$$

где  $m = 1 + 0,07R_{пр}$ ,

$$R_{пр} = \frac{1}{2(A+B)}, \quad (16)$$

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{ш}} + \frac{1}{R_{заг}} \right)$$

$$B = \frac{1}{2R_{ш}}$$

где  $R_{пр}$  – приведенный радиус контактирующих поверхностей.

Упругодеформированный слой определяем на основании соотношения

$$\frac{\sin\varphi_y}{\sin\varphi} = \frac{a_y}{a_s} \quad (17)$$

$$a_y = \frac{\sin\varphi_y \cdot a_s}{\sin\varphi}$$

5. Строим эпюру начальных напряжений

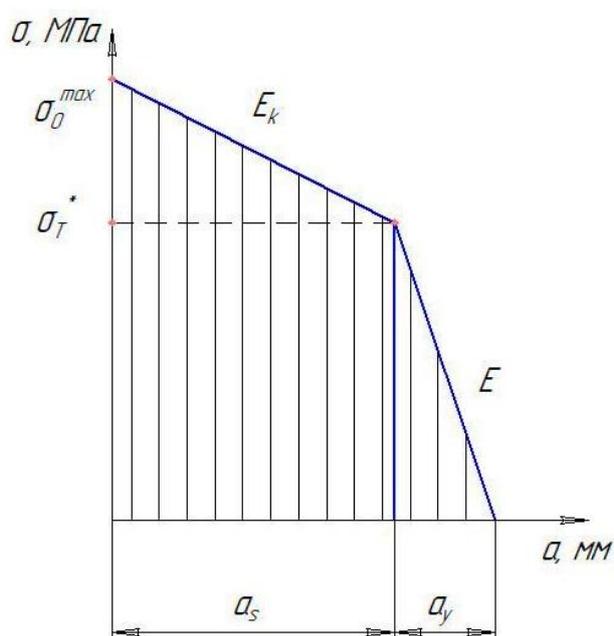


Рисунок 11 – Эпюра начальных напряжений

6. Определяем площадь эпюры  $P_H$

$$P_H = \frac{1}{2} 2\sigma_T^* + E_k \varepsilon_p - \varepsilon_T^* a_s + \frac{1}{2} \sigma_T^* a_y \quad (18)$$

Для определения влияния отдельных режимов обработки ППД на интегральную характеристику эпюры начальных напряжений  $P_H$ , были выбраны технологические параметры, и по приведенным методикам были рассчитаны параметры эпюры начальных напряжения (таблица 2) и площадь

активной части эпюры (таблица 3). По расчётным данным были построены эпюры начальных напряжений, которые представлены на рисунках 12 и 13. В качестве образца выбрана сталь 45, механические свойства которой представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические свойства стали 45, подверженной нормализации

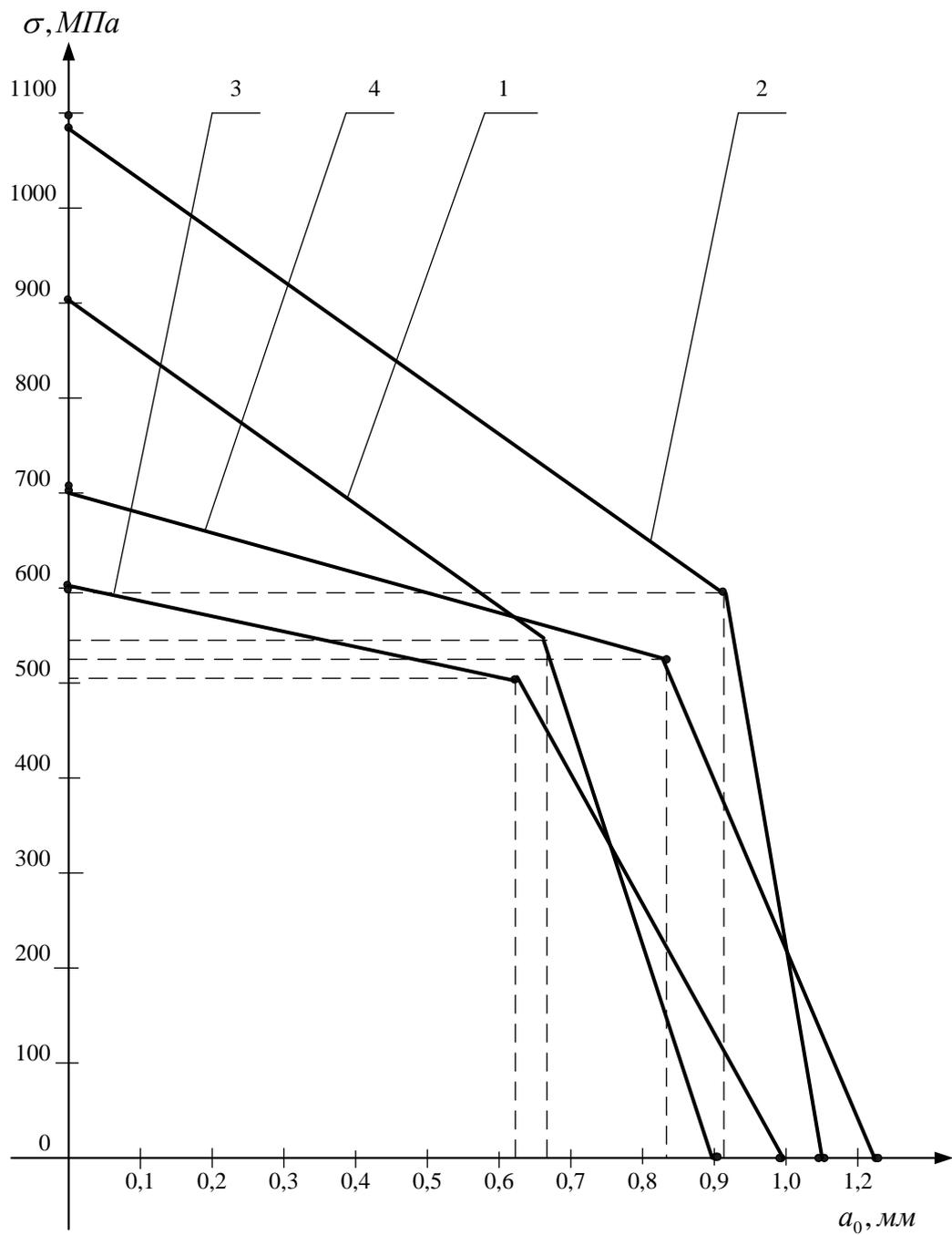
Предел текучести, $\sigma_T$	433 МПа
Предел прочности, $\sigma_B$	687 МПа
Модуль упругости, E	198800 МПа
Твердость, НВ	1860 МПа

Таблица 2 – Технологические режимы обработки и расчётные параметры эпюры начальных напряжений

P, Н	$v$ , м/мин	S, мм/о б	$E_k$	$\epsilon_p$	$\epsilon_y = \epsilon_T$	$a_s$ , мм	$a_y$ , мм	$\sigma_T^*$ , МПа	$\sigma_0^{\max}$ , МПа
500	20	0,11	0,720	0,0852	0,028	0,6786	0,2232	546,76	903,50
900	40	0,07	0,717	0,1099	0,03	0,9105	0,2484	594,13	1085,34
500	40	0,07	0,720	0,0441	0,026	0,6220	0,3668	504,19	602,15
900	20	0,11	0,717	0,0582	0,027	0,8346	0,3873	522,85	704,61
500	20	0,07	0,720	0,0842	0,028	0,6786	0,2257	559,24	903,14
900	40	0,11	0,717	0,1114	0,029	0,9105	0,2370	579,27	1097,75
500	40	0,11	0,720	0,0444	0,026	0,6220	0,3642	496,97	600,36
900	20	0,07	0,717	0,0576	0,027	0,8346	0,3909	532,79	706,15

Таблица 3 – Расчетное значение интегральной характеристики эпюры начальных напряжений  $P_n$

№ эпюры	$P_n$ , кН/м
1	553,091
2	838,370
3	436,540
4	613,468
5	559,316
6	832,082
7	431,786
8	621,124



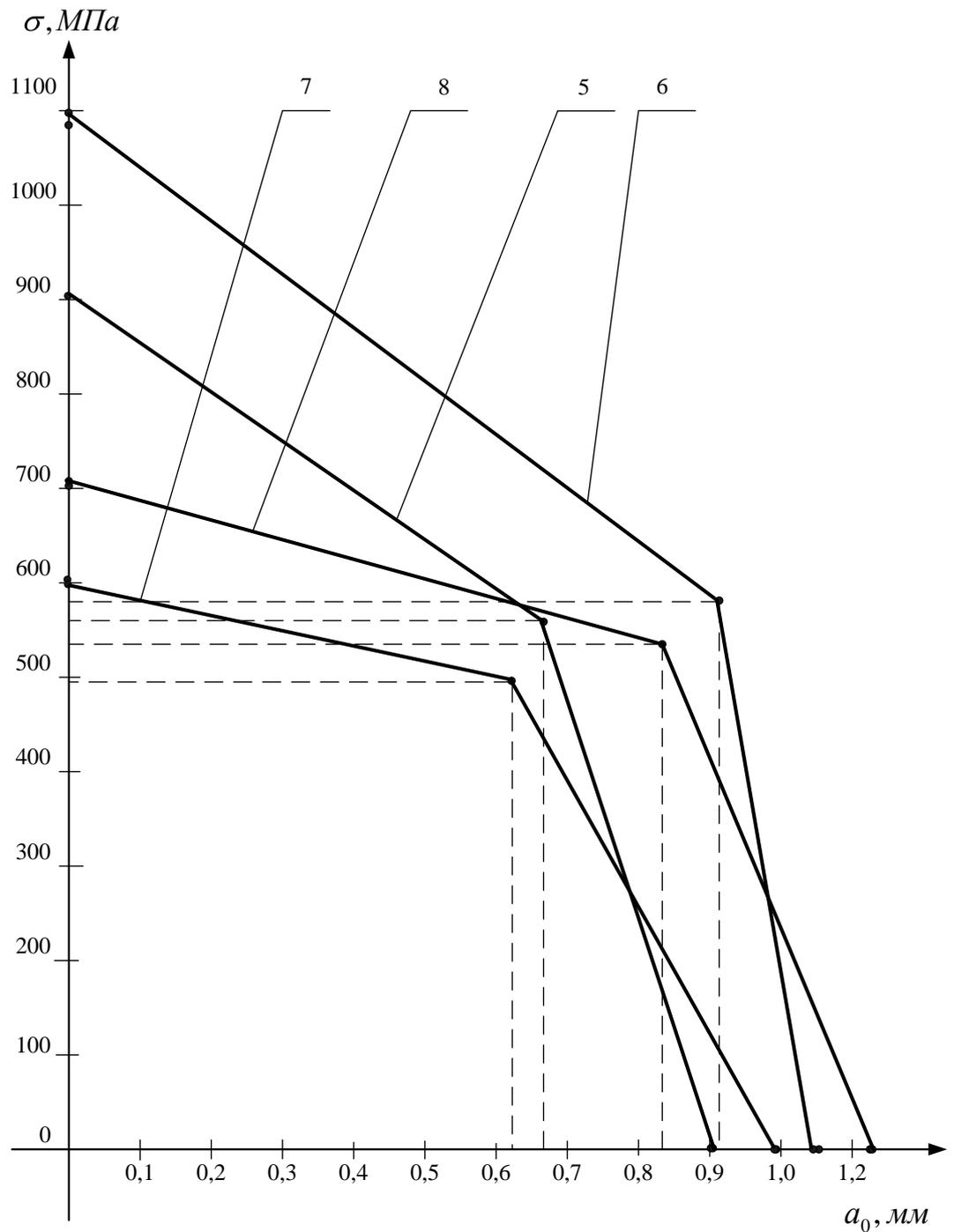
1-  $P = 500 \text{ Н}$ ,  $v = 20 \text{ м/мин}$ ,  $s = 0,11 \text{ мм / об}$ ;

2 -  $P = 900 \text{ Н}$ ,  $v = 40 \text{ м/мин}$ ,  $s = 0,07 \text{ мм / об}$ ;

3 -  $P = 500 \text{ Н}$ ,  $v = 40 \text{ м/мин}$ ,  $s = 0,07 \text{ мм / об}$ ;

4 -  $P = 900 \text{ Н}$ ,  $v = 20 \text{ м/мин}$ ,  $s = 0,11 \text{ мм / об}$ ;

Рисунок 12 – Эпюры начальных напряжений в образцах из Стали 45 после обкатывания на различных режимах ППД



5 -  $P = 500$  Н,  $v = 20$  м/мин,  $s = 0,07$  мм / об;

6 -  $P = 900$  Н,  $v = 40$  м/мин,  $s = 0,11$  мм / об;

7 -  $P = 500$  Н,  $v = 40$  м/мин,  $s = 0,11$  мм / об;

8 -  $P = 900$  Н,  $v = 20$  м/мин,  $s = 0,07$  мм / об;

Рисунок 13 – Эпюры начальных напряжений в образцах из Стали 45 после обкатывания на различных режимах ППД

По полученным данным, представленным в таблице 2, была определена экспериментальная зависимость интегрального показателя  $P_H$  от технологических параметров обработки. Так, площадь активной части эпюры может быть определена с помощью уравнения регрессии, которое имеет вид:

$$P_H = -1,2 \cdot P^{0,62} S^{0,03} v^{-0,01} \quad (19)$$

где  $P$  – сила прижатия инструмента;

$S$  – продольная подача;

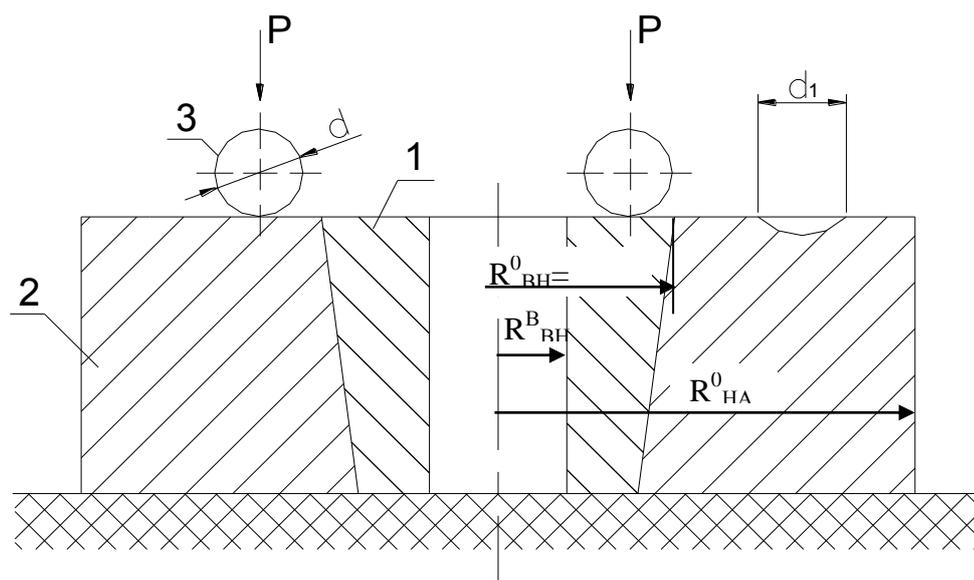
$v$  – скорость обкатывания.

Данная зависимость показывает, что наибольшее влияние на эпюру начальных напряжений оказывает сила прижатия инструмента, в меньшей же степени влияют его продольная подача и скорость обработки. Согласно рисункам 12, 13, представленным в виде эпюр начальных напряжений и расчетным данным в таблице 3, можно однозначно сказать, что наибольшая площадь активной части эпюры достигается при использовании режимов обработки  $P = 900$  Н,  $v = 40$  м/мин и  $s = 0,07 \div 0,11$  мм/об, следовательно обработка заготовок из Стали 45 на предложенных режимах позволит создать в поверхностном слое необходимую величину остаточных напряжений сжатия и глубину их залегания, которые в определенных условиях эксплуатации будут сохраняться долгое время, и оказывать сопротивление упругопластическим деформациям, возникающим при эксплуатации изделий. Стоит отметить, что подобранные технологические параметры согласуются с рекомендованными параметрами, указанными у Л.Г. Одинцова и Д.Д. Папшева, вследствие этого, очевидно, что приведенная выше методика по выбору силы прижатия инструмента дает адекватные результаты, и может быть успешно применена на практике.

## **2.4 Методика исследования влияния остаточных напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям**

Одной из главных трудностей определения влияния собственно остаточных напряжений на сопротивление деталей упругопластическим деформациям заключается в том, что при любой обработке, в частности и обработке ППД, помимо наведения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей, происходит изменение микрорельефа поверхности, ее структуры и твердости, которые оказывают различное влияние на конечный результат. Следовательно, для однозначного определения влияния остаточных напряжений на эксплуатационные свойства изделий необходимо исключить влияние других факторов. Это позволяет сделать метод наведения дополнительных напряжений путем упругой деформации деталей. Метод дает возможность при формировании различного уровня остаточных напряжений сохранить неизменными шероховатость, структуру и твердость поверхности. В основе данного метода лежит известное положение о том, что остаточные напряжения I рода и напряжения, возникающие от упругого деформирования при приложении к детали внешних сил аналогичны по своей сущности и воздействию на деталь.

Для изучения влияния остаточных напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям, последние имитируются напряжениями от упругого деформирования посредством запрессовки вставки 1 в обойму 2 с разной величиной натяга ( $\Delta$ , мм) по сопряженным поверхностям (рисунок 14). В результате запрессовки во вставке 1 создается напряжение сжатия, а в обойме 2 – растяжения.



1-вставка; 2-обойма; 3-индентор

Рисунок 14 – Схема нанесения сферического отпечатка на напряженную поверхность

Величина дополнительных напряжений в зависимости от величины натяга определяется из решения задачи Ляме [39] по формуле:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{E \cdot \Delta \cdot R_{\text{вн}}}{2 \cdot R_{\text{нар}}^2} \quad (20)$$

где  $E$  – модуль упругости материала вставки и обоймы (МПа);  
 $R_{\text{нар}}$  и  $R_{\text{вн}}$  – наружный и внутренний радиус обоймы или вставки (мм);  
 $\Delta$  - величина натяга (мм).

Проведение испытание осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 57172-2016 [40]. Суть испытания состоит во вдавливании индентора в торцевую поверхность вставки и обоймы на прессе Бринелля, имеющую напряжения от упругой деформации, с нагрузкой  $P$ , приложенной перпендикулярно к поверхности образца, в течение некоторого времени, с последующей разгрузкой. В результате на поверхности исследуемого образца образуется отпечаток диаметром  $d$ . Диаметр отпечатка и является

показателем способности материала сопротивляться упругопластической деформации, при наличии в поверхностном слое напряжений I рода. По окончании эксперимента измеряется диаметр  $d$  отпечатка с помощью микроскопа МПБ – 2. Результаты эксперимента представляются в виде графиков зависимостей  $d_1=f(\Delta)$  и  $d_1=\psi(\sigma_{\text{доп}})$  для вставки и обоймы соответственно.

### 3 Результаты исследований влияния остаточных напряжений на сопротивление материала упругопластическим деформациям

Исследования влияния остаточных напряжений на сопротивление упругопластической деформации проводились на цилиндрических образцах марки сталь 45.

С помощью запрессовки вставки в обойму в заготовках были созданы упругие напряжения, аналогичные остаточным напряжениям I рода. Размеры образцов и величина натяга представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры исследуемых образцов

№ образца	Внутренний радиус обоймы $R_{вн}$ , мм	Наружный радиус вставки $R_{нар}$ , мм	Величина натяга $\Delta$ , мм
1	50,400	50,630	0,230
2	50,040	50,180	0,140
3	50,050	50,140	0,090
4	50,034	50,100	0,066

Наружный радиус обоймы  $R_{нар} = 75$  мм

Внутренний радиус вставки  $R_{вн} = 15$  мм

Модуль упругости  $E = 198800$  МПа

На рисунке 15 представлены эпюры распределения напряжений в поверхностном слое заготовок, возникших при запрессовке вставки в обойму [41].

Величина дополнительных напряжений в зависимости от величины натяга была определена для каждого образца из решения задачи Ляме по формуле 20. Результаты расчётов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Величина дополнительных напряжений для исследуемых образцов

№ образца	$\sigma_{\text{доп(обойма), МПа}}$	$\sigma_{\text{доп(вставка), МПа}}$
1	204,8435	133,7795
2	123,7967	82,8980
3	80,3152	53,3768
4	58,3543	39,2054

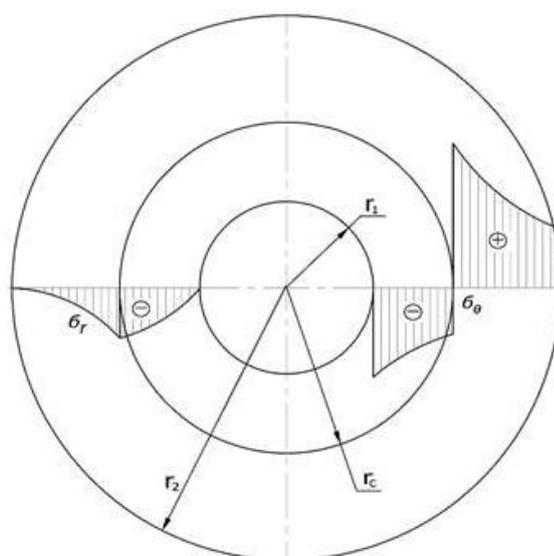


Рисунок 15 – Эпюры напряжений в соединении с натягом

После чего на прессе Бринелля было осуществлено вдавливание сферического индентора в торцевую поверхность обоймы и вставки образцов (рисунок 16).



Рисунок 16 – Исследуемые образцы со сферическими отпечатками

В качестве индентора использовался шарик диаметром  $d=5$  мм из стали ШХ15 (HRC 41-43). Вдавливание осуществлялось с нагрузкой  $P=750$  кгс и временем выдержкой  $t=10$  с, с последующей разгрузкой. В результате на поверхности заготовок были сформированы отпечатки. Способность материала сопротивляться упругопластической деформации оценивалась по ширине остаточной лунки на поверхности изделия, замеры которой были произведены с помощью микроскопа МПБ-2 (рисунок 17). Значения диаметров отпечатков для четырех образцов представлены в таблице 5.



а



б

Рисунок 17 – Микроскоп МПБ-2, а – внешний вид микроскопа; б – процесс замера отпечатка

Таблица 5 – Диаметры отпечатка на исследуемых образцах

№ образца	Диаметр отпечатка на обойме	Диаметр отпечатка на вставке
	$d_2$ , (мм)	$d_1$ , (мм)
1	5,300	5,000
2	5,300	5,100
3	5,250	5,100
4	5,250	5,450

По результатам исследований были построены зависимости  $d=f(\Delta)$  (рисунок 18) и  $d=\psi(\sigma_{доп})$  (рисунок 19).

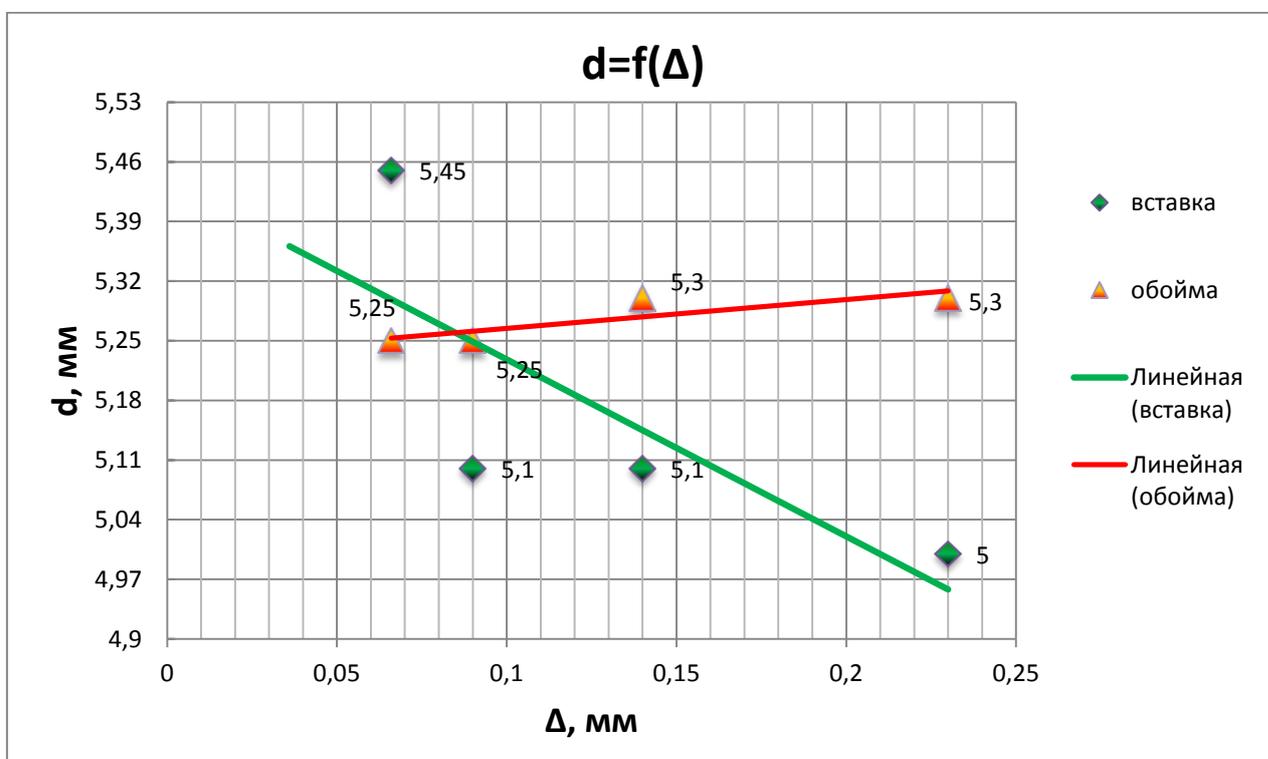


Рисунок 18 – Зависимость диаметров отпечатка  $d$  на обойме и вставке образца от натяга  $\Delta$

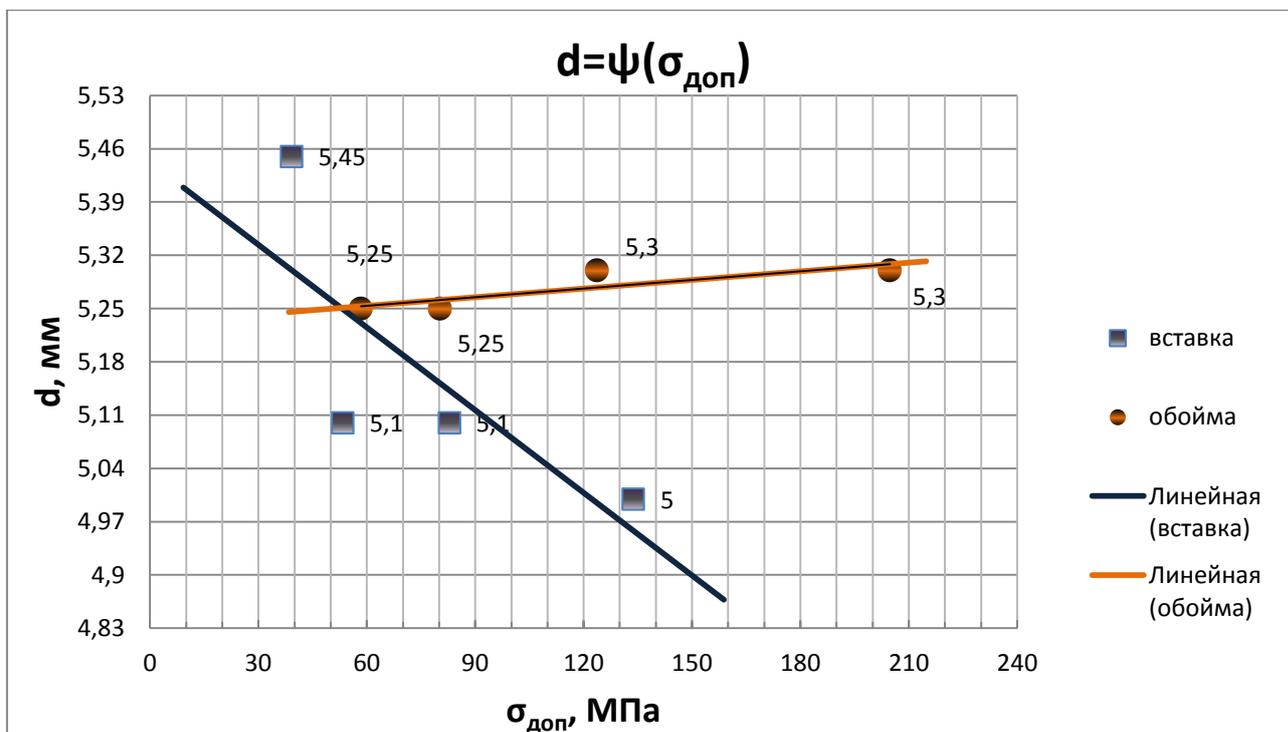


Рисунок 19 – Зависимость диаметров отпечатка  $d$  на обойме и вставке образца от величины дополнительных напряжений  $\sigma_{\text{доп}}$

Анализируя полученные результаты, были сделаны выводы. Наличие в поверхностном слое образцов остаточных напряжений, их величина и знак значительно влияют на геометрические параметры отпечатка от индентора, что и показывают представленные расчеты (таблица 4) и зависимости (рисунок 18,19).

Анализ рисунка 18 (график для обоймы) показывает, что диаметр отпечатка увеличивается, по мере увеличения величины натяга, что обусловлено ростом растягивающих напряжений в поверхностном слое образцов с 58 МПа до 205 МПа. Данный факт указывает на то, что поверхностный слой с растягивающими напряжениями способствует развитию упругопластических деформаций а, следовательно, и в деталях, работающих в условиях циклического нагружения, появление напряжений растяжения крайне нежелательно.

Чего нельзя сказать про возникающие сжимающие напряжения в поверхностном слое вставок исследуемых образцов. Так в образце под

номером 1, после запрессовки, за счет наибольшего натяга, возникли дополнительные напряжения, величина которых составила 134 МПа. После замера отпечатка было выявлено, что его ширина составляет 5 мм, как и диаметр деформирующего индентора. Это указывает на то, что поверхность, имеющая сжимающие остаточные напряжения оказывает значительное сопротивление упругопластическому вдавливанию. Образцы под номерами 3 и 4, имеют посадку с перекосом, что оказало значительное влияние на дополнительные напряжения, созданные в поверхностном слое при запрессовке. Так, образец 3 получил угол перекоса больше, чем допустимое значение, что увеличило величину натяга на некоторое неизвестное значение, что и отразилось на диаметре оставшегося отпечатка на поверхности образца.

Полученные результаты позволяют сделать однозначный вывод о влиянии напряжений как таковых и остаточных напряжений в частности на способность поверхностных слоев деталей сопротивляться упругопластическим деформациям. Поскольку именно упругопластическая деформация, возникающая при взаимодействии микрорельефов элементов трибосопряжений, работающих в условиях жидкостного и полужидкостного трения, является основным процессом, приводящим к износу поверхностей, то для сокращения интенсивности изнашивания деталей следует создавать напряжения в поверхностном слое, которые будут оказывать противодействие этой деформации. Именно сжимающие напряжения, складываясь с деформацией, оказывают ей сопротивления, за счет разности знаков. Что и доказывают результаты эксперимента, проведенного в данной выпускной квалификационной работе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При решении поставленных задач в данной дипломной работе были изучены методики расчета деформаций и сил прижатия инструмента во время обработки отделочно-упрочняющим обкатыванием, а так же методика расчет параметров эпюры начальных напряжений и ее интегральной характеристики. Представленные методики позволяют выбирать оптимальные режимы обработки ППД, обеспечивающие оптимальное напряженное состояние изделий, которое при определенных условиях эксплуатации способно оказывать сопротивление упругопластическим деформациям, а, следовательно, и значительно сократит интенсивность изнашивания при определенных эксплуатационных условиях. Данные методики были рассмотрены на примере деталей, изготовленных из стали 45. Так для обработки ППД изделий из стали 45, были получены оптимальные режимы  $P = 900 \text{ Н}$ ,  $v = 40 \text{ м/мин}$  и  $s = 0,07 \div 0,11 \text{ мм/об}$ .

Для подтверждения влияния остаточных напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям, были проведены экспериментальные исследования. В результате были получены зависимости, которые показывают, что напряжения растяжения в поверхностном слое, способствуют развитию упругопластических деформаций. А напряжения сжатия, наоборот оказывают им сопротивление, причем, чем больше величина сжимающих напряжений, тем больше поверхность сопротивляется упругопластическим деформациям.

Таким образом, наведение в поверхностном слое деталей остаточных напряжения сжатия, безусловно, является положительным фактором, который можно использовать для повышения эксплуатационных свойств деталей, работающих в условиях жидкостного и полужидкостного трения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мураткин, Г.В. Повышение надежности коленчатых валов при ремонте двигателей / Г.В. Мураткин, А.А. Дятлов // Ремонт, восстановления, модернизация. 2013. № 5. С.25 – 31.
2. Авдонькин, Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей: учеб. Пособие / Ф.Н. Авдонькин. – Саратов. : Изд-во Саратов. Ун-та, 1981. – 288 с.
3. Мураткин, Г.В. Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей. В 2 ч. Ч. 1. Технологические методы восстановления деталей и ремонта автомобилей: учеб. пособие / Г.В. Мураткин. – Тольятти. : Изд-во ТГУ, 2012. – 247 с.
4. Дальский, А.М. Направленное формирование показателей качества / А.М. Дальский, А.С. Васильев, А.И. Кондаков // Образование через науку : сборник докладов Международного симпозиума / Федеральное агентство по образованию Рос. Федерации, МГТУ им Н. Э. Баумана. М., 2006. – 204 с.
5. Подзей, А.В. Технологические остаточные напряжения / А.В. Подзей. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
6. Маталин, А.А. Технология механической обработки / А.А. Маталин. – Л. : Машиностроение. 1977. – 464 с.
7. Сулима, А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей / А.М. Сулима. – М. : Машиностроение. 1996. – 480 с.
8. Носов, Н.В. Физико-механическое состояние поверхностного слоя при финишной абразивной обработке поверхностей трения / Н.В. Носов, Ю.И. Шилова, Н.В. Лысенко // Машиностроение и машиноведение. 2016. С 303 – 310.
9. Bowden P.P., Tabor D. The Friction and Lubrication of SoHds / P.P. Bowden, D. Tabor // Oxford at the Clarendon Press, 1964. P. 544.

10. Кораблин, А.В. Повышение износостойкости подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания / А.В. Кораблин, А.Ф. Сафиулин // Вестник астраханского государственного технического университета. 2013. № 2. С. 111-118.
11. Barwell F.T. Trilology in production. Product Eng / F.T. Barwell // Or. Brit. 1972. №7. P. 263-271.
12. Campbell Y. The development and testing of engine bearings // IAAE Journal, 1964, V. 24. № 11-12. - P. 182-193.
13. Терентьев, В.Ф. Теория и практика повышения надежности и работоспособности конструкционных металлических материалов: учеб. пособие / В.Ф. Терентьев. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 268 с.
14. Решетников, М.К., Технология и оборудование вибромеханической релаксации остаточных напряжений в прецизионных деталях машин: учеб. пособие / М.К. Решетников. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2013. – 76 с.
15. Благовский, О. В. Управление формированием остаточных напряжений в ответственных деталях при их изготовлении с использованием ультразвуковых колебаний :дис. канд. тех. наук : 05.02.08 : защищена 22.01.02 : утв. 15.07.15 / Благовский Олег Валерьевич. У., 2015. 151 с.
16. Liu H.W. Fatigue Crack Propagation and Apphed Stress Range – An Energy Approach // Journal of Basic Engineering, ASME Transactions, Series D, 85.-P. 116.
17. Кудрявцев, П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений / П.И. Кудрявцев. – М. : Машиностроения. 1964. – 95 с.
18. Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев. – М. : Машиностроение. 1978. – 152 с.
19. Перлин, Е.Ю. Физика твердого тела. Оптика полупроводников, диэлектриков, металлов, учеб. пособие / Е.Ю. Перлин, Т.А. Вартамян, А.В. Федоров. – Санкт - Петербург: СПбГУ ИТМО, 2008. – 216 с.

20. Павлов, А.В. Физика твердого тела. Учеб. - 3-е изд. / А.В. Павлов, А.В. Хохлов. – М. : 2000. – 494 с.
21. Маталин, А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин. – Киев: Техника, 1971. – 142 с.
22. Борздыка, А.М. Релаксация напряжений в металлах и сплавах / А.М. Борздыка, Л.Б. Гецов. – М. : Металлургия, 1972. – 304 с.
23. Подзей, А. В. Технологические остаточные напряжения / А.В. Подзей. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
24. Мураткин, Г.В. Повышение релаксационной стойкости материала поверхностным пластическим деформированием / Г.В. Мураткин, В.А. Сарафанова, М.О. Суворов // Механическая обработка заготовок и сборка. 2016. С. 19-26.
25. Steinez M. Bezpecnost silnicneho provozu z hlediska technickeho stavu motorovych vozidel. - Praha, Dom techniky, CSYUTS, 1978.
26. Коцюбинский, О.Ю. Коробление чугунных отливок от остаточных напряжений / О.Ю. Коцюбинский. – М. : Металлургия, 1965. – 174 с.
27. Коцюбинский, О.Ю. Стабилизация размеров чугунных отливок / О. Ю. Коцюбинский. – М. : Машиностроение, 1974. – 152 с.
28. Папшев, Д.Д. Технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин поверхностным упрочнением: учеб. пособие / Д.Д. Папшев. – Куйбышев: Изд-во КПТИ, 1983. – 81 с.
29. Подзей, А.В. Технологические остаточные напряжения / А.В. Подзей. – М. : Машиностроение, 1978. – 216 с.
30. Костецкий, Б.И. Качество поверхности и трение в машинах / Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колисниченко. – Киев: Техника, 1969. – 216 с.
31. Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. – М. : Машиностроение, 1973. – 256 с.

32. Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.
33. Папшева, Н.Д. Влияние температуры на устойчивость эффекта упрочнения / Н.Д. Папшева. – Куйбышев: КПТИ, 1976. – 65 с.
34. Ящерицын, П.И. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П.И. Ящерицын, А.П. Минаков. – М. : Наука и техника, 1986. – 214 с.
35. Мураткин, Г.В. Исследование влияния методов правки на размерную стабильность длинномерных валов ответственного назначения / Г.В. Мураткин // Новые материалы и технологии их производства. 2014. С 37 – 44.
36. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. / Л.Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
37. Папшев, Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шарами / Д.Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1968. – 132 с.
38. Кудрявцев, И. В. Повышение прочности стальных деталей обкаткой / И.В. Кудрявцев. – М. : Машгиз, 1948. – 183 с.
39. Научная библиотека.: Задача Ляме для полого цилиндра [Электронный ресурс]. 2006. URL: [http://sci.alnam.ru/book\\_t\\_upr.php?id=167](http://sci.alnam.ru/book_t_upr.php?id=167)(дата обращения: 14.05.2019).
40. ГОСТ Р 57172-2016.Определение поверхностных остаточных напряжений методом инструментального индентирования. – Введ. 2018–01–01. – М.: Стандартиформ, 2016. 27 с.
41. Научная библиотека.: Соединение деталей и узлов машин [Электронный ресурс]. 2012. URL: <http://mirznanii.com/a/191411-9/soedineniya-detaley-i-uzlov-mashin-9> (дата обращения: 01.06.2019).