

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)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Инжиниринг перспективных материалов и диагностика поведения  
материалов в изделиях

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТРЕСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему: «Повышение износостойкости поверхностей на основе управления остаточными напряжениями при обработке поверхностным пластическим деформированием»

Студент

П.В. Попова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент, Г.В. Мураткин

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

Тольятти 2021

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Технологическое обеспечение высокой надежности и долговечности деталей ответственного назначения.....	6
1.1 Анализ работы подшипников скольжения шейки коленчатого вала – вкладыш.....	6
1.2 Общие сведения об остаточных напряжениях и их влияние на сопротивление усталости .....	12
1.3 Анализ существующих методов повышения износостойкости коленчатых валов .....	20
1.4. Анализ влияния технологических параметров обработки ППД на остаточные напряжения.....	25
1.5 Релаксация остаточных напряжений в деталях .....	29
Глава 2 Определение роли остаточных напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям.....	34
2.1 Влияния остаточных напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям.....	34
2.2 Исследование повышения износостойкости деталей путем изменения силы, приложенной к инструменту, в процессе ППД.....	40
Глава 3 Экспериментальное исследование влияния остаточных напряжений на износостойкость .....	61
Заключение .....	66
Список используемой литературы .....	68

## Введение

В настоящее время, важнейшим вопросом современного машиностроения является проблема повышения эксплуатационной надежности автотранспортных средств, зависящая от ограниченного числа высоконагруженных деталей ответственного назначения.

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. При этом их долговечность составляет в среднем 80% от ресурса двигателей. Поэтому повышение эксплуатационной надежности и долговечности коленчатых валов в настоящее время является весьма актуальной задачей.

Анализ статистических данных показывает, что нарушение нормального функционирования двигателей внутреннего сгорания происходит наиболее часто вследствие отказа трибоузла «шейка коленчатого вала – вкладыш». Отказ трибоузла происходит по причине изнашивания и деградации поверхностей трения, вследствие физических и химических процессов происходящих во время работы двигателя, а также из-за нарушения общих правил технической эксплуатации и нестабильной работы фильтров очистки масла.

Сложность решения данной проблемы состоит в том, что причины разрушения трибоузла «шейка коленчатого вала – вкладыш» охватывают достаточно многие сферы исследования, такие как металловедение, триботехника, механика разрушения и др., что, в свою очередь, тормозит конкретизацию закономерностей и развития процессов изнашивания. Так, решение проблемы изнашивания возможно при установке причин и последствий отказов подшипников скольжения и методов их устранения.

Надежность и долговечность коленчатых валов зависят от качества их изготовления. А необходимые эксплуатационные свойства обеспечиваются

за счет высокой точности, шероховатости рабочих поверхностей шатунных и коренных шеек, и прочности их поверхностного слоя. Качество поверхностного слоя формируется на протяжении всего технологического процесса изготовления коленчатого вала, но особое внимание уделяется финишным операциям.

В настоящее время промышленные предприятия имеют широкие возможности для производства деталей согласно техническим условиям. Так, для получения продукта с желаемыми характеристиками и свойствами, производства постоянно модифицируют параметры технологического процесса, при этом одной из главных целей модернизации технологического процесса является повышение эффективности производства, поскольку потеря хотя бы одной партии изделий приводит к снижению конкурентоспособности данного продукта. Именно эти факты и привели к разработке большого количества разнообразных методов финишной обработки таких как суперфиниширование, хонингование, шлифование, полирование и т.д.

Большинство вышеперечисленных методов позволяют увеличить эксплуатационные свойства изделий благодаря снижению шероховатости. На сегодняшний день выявлена роль шероховатости поверхностного слоя изделий в обеспечении износостойкости коленчатых валов, однако возможность повышения эксплуатационных характеристик за счет снижения шероховатости практически полностью исчерпана. В связи с чем возникает необходимость использовать для этих целей другой, но не менее важный показатель качества поверхностного слоя – остаточные напряжения, определяющие его физико-механические свойства.

Анализируя достаточное количество источников, становится понятно, что единое мнение о влиянии остаточных напряжений на износостойкость деталей отсутствует. 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.

Таким образом, целью данной диссертации является повышение износостойкости коленчатых валов за счет управления напряженным состоянием на этапах их изготовления.

В качестве метода, позволяющего, помимо снижения шероховатости, преобразования структуры поверхностного слоя и повышения твердости, создать благоприятное напряженное состояние поверхностного слоя коленчатых валов был выбран метод поверхностного пластического деформирования. Такой выбор не случаен. Изучив литературные источники, был сделан вывод, что методы ППД являются перспективными за счет низкой стоимости (технология может быть выполнена на токарном станке с дополнительным устройством), низкой трудоемкостью, а также отсутствием каких-либо промышленных отходов.

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

Известно, основная доля отказов агрегатов и узлов автомобилей обусловлена изнашиванием и усталостью. Несмотря на различных характер внешнего проявления отказов, в их основе заложены одни и те же закономерности, анализ которых позволяет определить причины их появления и пути повышения надежности и долговечности деталей.

Усталостная теория изнашивания гласит, что большинство видов изнашивания носит усталостный характер, то есть износ поверхностей происходит в следствие многократных повторных нагружений единичной фрикционной связи до отделения частиц износа.

### **1.1 Анализ работы подшипников скольжения шейки коленчатого вала – вкладыш**

Наиболее распространёнными дефектами шеек коленчатого вала является износ, характеризующийся появлением отклонений форм и изменению размеров, а также образованием круговых рисок и царапин глубиной до 0,05 мм, реже встречаются задиры, трещины и точечная коррозия. Благодаря анализу литературных источников, установлено, что у 66,7 % коленчатых валов, поступающих на восстановление, величины износов и отклонений формы шеек значительно меньше допускаемых. Однако риски и круговые царапины на шейках характерны для 99 % коленчатых валов. Задиры шеек имеют до 33 % валов, расплавление вкладышей и наволакивание металла на шейки – менее 5 % валов, деформацию – до 24 % [21].

Для подшипников скольжения характерна работа в условиях трения

скольжения. При работе двигателя в штатном режиме трибосопряжение шейки коленчатого вала – вкладыш работает со смазочным материалов, и подвержено механическому и коррозионно-механическому изнашиванию.

Для этих видов изнашивания в работе [21] предложена зависимость износа деталей от трения:

$$S = a_0 \cdot a_1 l \cdot a_2 l^2 \cdot a_3 l^3, \quad (1)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  ( $a_2 < 0$ ) – параметры, определяемые по экспериментальным методам наименьших квадратов;  $S$  – износ деталей;  $l$  – время работы.

Данный тип зависимости распространяется на все виды изнашивания.

В целом весь процесс изнашивания можно представить в виде обобщенной диаграммы, которая состоит из трех периодов: приработки, нормального и ускоренного изнашивания (рисунок 1). Рассмотрим каждый этап более подробно.

Поскольку в начальный период приработки соприкосновение сопряженных деталей происходит по вершинам микронеровностей, можно сделать вывод, что фактическая поверхность составляет лишь небольшую часть от расчетное величины. В вершинах микронеровностей возникают большие удельные давления, под действием которых происходит смятие исходной шероховатости в местах контакта 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»  $U_n$  поверхностей (рисунок 1, график 1), вследствие которого быстро увеличивается зазор между сопряженными деталями.

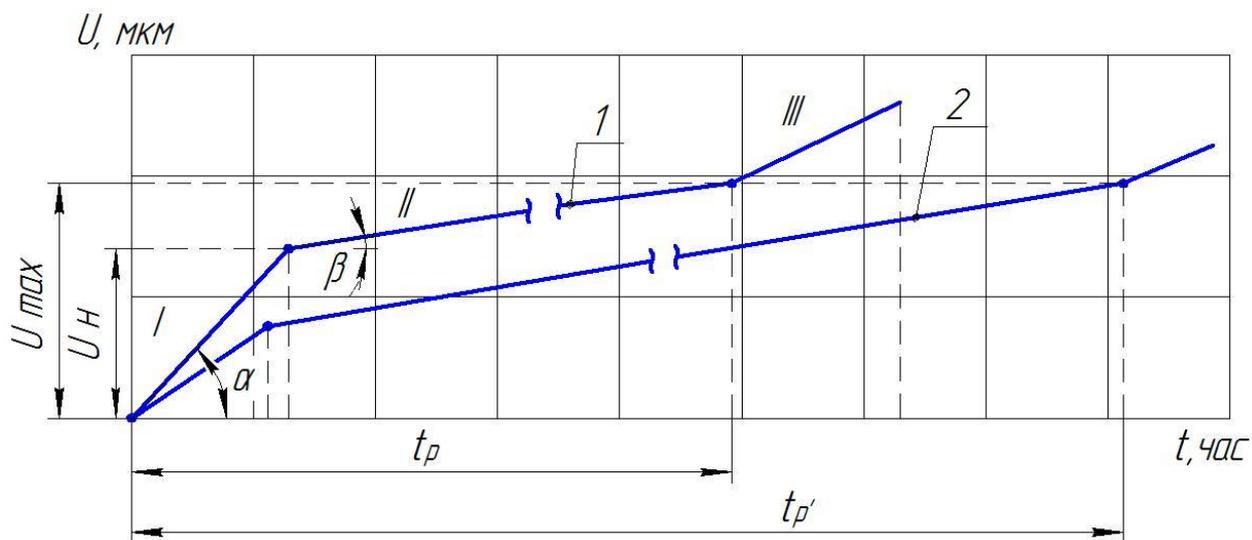


Рисунок 1 – Графики процесса изнашивания изделий

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

«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.» [37]

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 (шероховатость, твердость, структура

граничного слоя металла, цельность поверхности) приобретают оптимальные значения, соответствующие данным условиям эксплуатации.

В периоде нормального изнашивания эксплуатационные характеристики приобретают оптимальные значения и как бы самоподдерживаются вплоть до наступления предельного состояния изделия, который характеризуется величиной допустимого износа  $U_{\max}$ , величина которого и определяет долговечность  $t_p$  деталей.

При дальнейшей эксплуатации начинается переход к ускоренному изнашиванию. Период ускоренного изнашивания характеризуется возникновением динамических нагрузок и лавинообразным образованием различных дефектов, которые в свою очередь приводят к отказу трибосопряжений и в дальнейшем к отказу машины. В связи с чем стремятся не допускать эксплуатацию машины в условиях ускоренного изнашивания ее комплектующих.

Так, для увеличения срока службы механизмов необходимо с помощью рационально подобранного технологического процесса сформировать определённый комплекс характеристик поверхностного слоя деталей, а именно микропрофиль, твердость и структуру материала, благодаря которому возможно уменьшение начального износа  $U_n$  и сокращение периода приработки. Тогда комплектующие детали смогут, минуя период приработки вступить в период нормального изнашивания, что в целом станет причиной увеличения долговечности изделий (рисунок 1, 2).

При работе двигателя в штатном режиме подшипники скольжения работают в условиях жидкостного трения. При таком трении поверхности трения разделены несущим слоем смазочного материала и непосредственный контакт микронеровностей рабочих поверхностей полностью отсутствует (рисунок 2, а). При жидкостном трении давление, под которым находится смазочный материал уравнивает действующую эксплуатационную нагрузку. При этом, толщина масляного клина во много раз превышает толщину граничной пленки и суммарную шероховатость рабочих

поверхностей, а его толщина не превышает величину, определяемую по формуле:

$$h = 100(R_{a1} + R_{a2}), \quad (2)$$

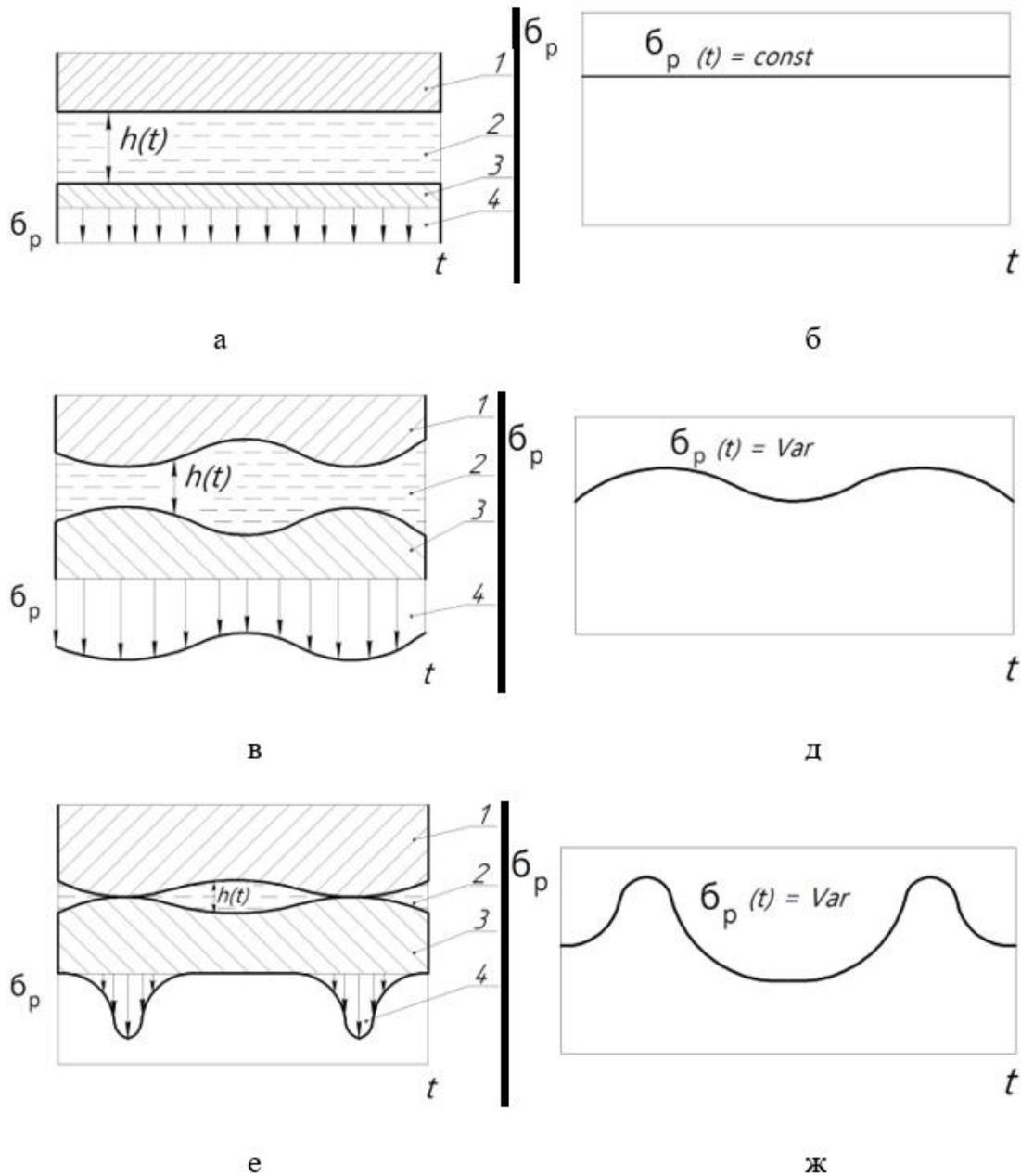


Рисунок 2 – Схемы нагружения элементов трибосопряжения коленчатого вала и графики рабочих напряжений, действующих на поверхность шатунной шейки

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

На основании этой формулы можно сделать вывод, что величина смазочного слоя колеблется в диапазоне  $5 \leq h \leq 100$ .

При работе подшипников скольжения в условиях жидкостного трения, коленчатые валы практически полностью реализуют свой заложенный потенциал, сформированный на стадии изготовления благодаря оптимальным качествам поверхностного слоя (шероховатость и упрочнение) шатунных и коренных шеек коленчатого вала.

Но на практике довольно часто при пусках и остановках, из-за высоких рабочих температур и нагрузок, недостаточной вязкости масла и его подачи создаются условия для полужидкостного трения. При таком трении в зазоре толщина масла является недостаточной, ввиду пульсации давления масла в зоне трения, возникающей при наложении динамических нагрузок на основные нагрузки. Пульсация давления масла в зазоре приводит к колебанию толщины масляного слоя и росту температур в зоне трения. При полужидкостном трении возникает более нагруженные участки поверхностей в месте сближения микронеровностей и при относительном движении этих поверхностей происходит циклическое изменение уровня рабочих напряжений в каждом локальном участке микронеровностей, что приводит к усталостному разрушению [21].

Далее по мере повышения рабочей температуры масла и проседания вкладыша происходит уменьшение толщины смазочного слоя менее 0,1 мкм. При этом в рабочей зоне между поверхностями возникает упругая и пластическая деформации, и на отдельных участках может происходить локальное внедрение поверхностей трения без разрушения граничной пленки. Если возникающие пластические деформации значительны, то в местах контакта деталей под действием высоких рабочих нагрузок и температур возникает разрушение масляного слоя с наступлением адгезии поверхностей и дальнейшим схватыванием металла на микроучастках (рисунок 2, е, ж). Все эти факторы приводят к ухудшению условий

нагрузению кривошипно-шатунного механизма, которое в конечном итоге заканчивается преждевременным отказом двигателей внутреннего сгорания.

## **1.2 Общие сведения об остаточных напряжениях и их влияние на сопротивление усталости**

Под технологией производства любых металлоизделий понимается совокупность металлургических переделов, операций и приемов, которая гарантированно обеспечивает получение продукции надлежащего качества. При этом качество продукции должно полностью определяться регламентированной совокупностью показателей состояния изделий.

В настоящее время, хорошо изучено влияние и определена ведущая роль шероховатости поверхности и упрочнения материала в повышении износостойкости деталей ответственного назначения. Однако возможность дальнейшего повышения износостойкости за счет необходимых параметров микрогеометрии и упрочнения технологическими методами практически полностью исчерпана.

Известно, что в результате технологического процесса изготовления деталей строение поверхностного слоя значительно отличается от основного материала. Под действием силовых и тепловых процессов происходит сдвиг в зернах металла, искажение кристаллической решетки и изменение размеров и формы зерен, в результате чего происходит изменение твердости и возникновение остаточных напряжений. Именно здесь и открываются возможности управления качеством поверхностного слоя, а значит и эксплуатационными свойствами деталей через режимы обработки [37].

На рисунке 3, представлена принципиальная схема строения поверхностного слоя изделий, подвергнутых технологической обработке:

«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.»

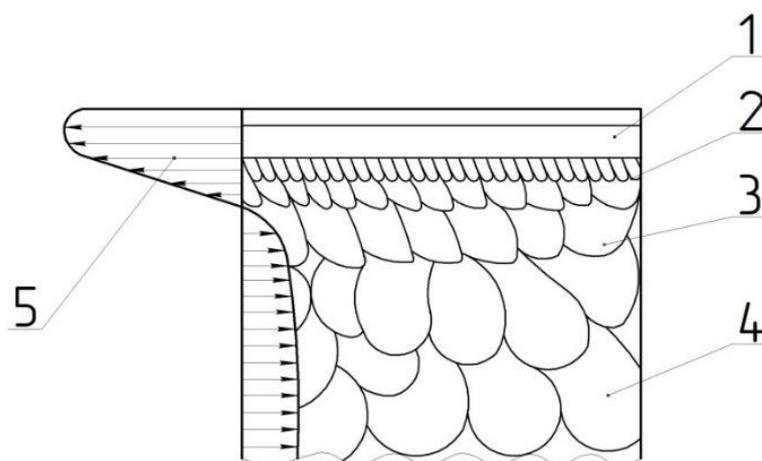


Рисунок 3 – Схема строения поверхностного слоя детали

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

«Если влияние микрорельефа поверхности и упрочнения материала поверхностного слоя на процесс изнашивания хорошо изучено, то о влиянии остаточных напряжений существуют достаточно противоречивые точки зрения, не смотря на то, что в производственной практике требования к качеству деталей включают знания о величине и характере их распределения

поверхностном слое в деталях автомобилей, подверженных усталостному изнашиванию.» [18]

Остаточными или технологическими называют напряжения, существующие в конструкции или в отдельных ее элементах при отсутствии внешних силовых, тепловых и других воздействий. Рациональное управление напряженным состоянием деталей позволит открыть новые возможности в сфере повышения эксплуатационных характеристик отдельных деталей и узлов автомобилей.

Вследствие объемных изменений в материале происходит возникновение остаточных напряжений. Причинами таких изменений являются:

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

Напряжённое состояние в поверхностном слое изделий можно описать схемой в виде трех перпендикулярных составляющих (рисунок 4), где  $\sigma_n^0$  осевые напряжения,  $\sigma_n^t$  – тангенциальные напряжения,  $\sigma_n^r$  – радиальные напряжения [18].

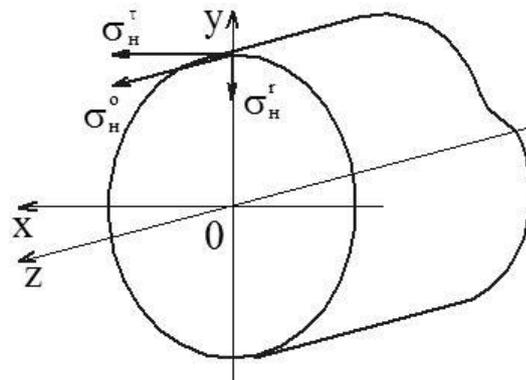


Рисунок 4 – Схема ориентаций составляющих остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрической детали [18]

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.

Проанализировав научные труды, становится понятно, что у авторов нет единого мнения о влиянии остаточных напряжений на износостойкость деталей.

Так, например, авторы [11, 26, 10] утверждают, что остаточные напряжения растяжения приводят к снижению износостойкости изделий. Однако, в работе [16] авторами представлено научно-теоретическое обоснование положительного влияния растягивающих напряжений на износостойкость.

В статьях [36, 40] приводится научно-исследовательское обоснование, что остаточные напряжения, как растяжения, так и сжатия способствуют уменьшению износа.

Отсутствие единого мнения по поводу влияния остаточных напряжений на эксплуатационные характеристики, в частности на износостойкость можно объяснить следующими причинами:

- выявлено, что остаточные напряжения проявляют себя с положительной стороны, когда процесс изнашивания носит усталостный характер. При других видах изнашивания остаточные напряжения проявляют себя в меньшей степени;
- в большинстве исследований для определения влияния остаточных напряжений на величину износа, рассматривается максимальное значение остаточных напряжений или глубина их залегания. Но указанные характеристики не отражают в полной мере величину внутренней силы от остаточных напряжений, поэтому выбор этих параметров для оценки влияния остаточных напряжений на износостойкости является неверным;

- еще одним немаловажным фактором в повышении эксплуатационных свойств является устойчивость остаточных напряжений в поверхностном слое.

На рисунке 5 представлена эпюра остаточных напряжений разделенная на 2 части ( активную и уравнивающую), и разграничивающаяся в точке 0. При таком характере распределения остаточных напряжений в поверхностном слое напряженное состояние является уравновешенным. При этом, стоит отметить, что остаточные напряжения как в активной, так и в уравнивающей части имеют упругий характер [32].

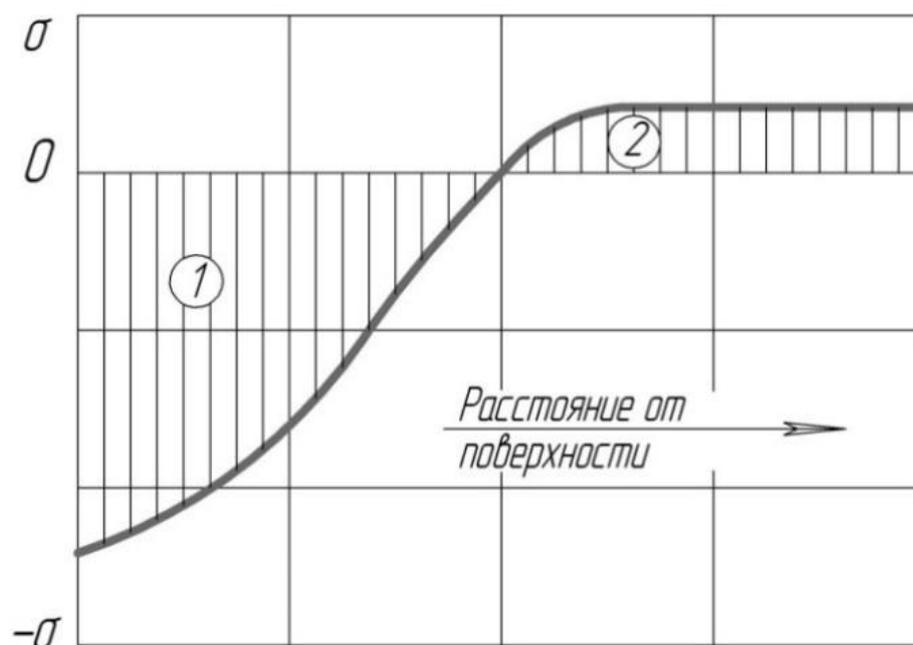


Рисунок 5– Эпюра остаточных напряжений в поверхностном слое изделия [18]

1 – активная часть; 2 – уравнивающая ( реактивная) часть эпюры

« Стоит отметить, что именно остаточные напряжения в активной части эпюры являются активным силовым фактором, оказывающий позитивное или негативное влияние на эксплуатационные свойства

изделий, и проявляющееся при воздействии внешних силовых факторов на деталь. Позитивное влияние остаточные напряжения оказывают только в тех случаях, когда повышают прочность материала и его способность сопротивляться 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.» [18]

При не рациональном выборе метода и режима обработки деталей ответственного назначения возникающая пластическая деформация с высокой интенсивностью может приводить к образованию значительного градиента остаточных напряжений в поверхностном слое. Помимо этого может возникать подслоный максимум напряжений, который является сильнейшим концентратором напряжений, влияющий на эксплуатационные свойства деталей.

« Эксплуатационные свойства изделий в целом зависят от уровня, знака и характера распределения остаточных напряжений ( градиент, асимметричность распределения в сечении, смещение максимума напряжений в глубину слоя и др.). Помимо всего прочего, влияние технологических остаточных напряжений на свойства деталей зависит также и 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 [17] 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.» [16]

Величина внутренней силы, обусловленной остаточными напряжениями, зависит от интегральной характеристики  $R_n$  их эпюры. Интегральная характеристика  $R_n$  представляет собой вектор, прикладываемый в центре тяжести эпюры и по величине равный её площади. Показатель  $R_n$  учитывает уровень и глубину распространения остаточных напряжений в поперечном сечении детали, не раскрывая порой сложный характер их распределения. Интегральный показатель  $R_n$  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

$$R_n = C_0 x_1^\alpha \cdot x_2^\beta \cdot x_3^\gamma \dots, \quad (2)$$

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

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.

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.

### **1.3 Анализ существующих методов повышения износостойкости коленчатых валов**

В различных отраслях машиностроения на финишных этапах обработки для формирования необходимых параметров качества поверхностного слоя все более широкое применение находят методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Методы ППД, такие как алмазное выглаживание, дробеструйная обработка, ультразвуковое обкатывание, отделочно-упрочняющее обкатывание и т.д. позволяют снизить шероховатость, обеспечить оптимальное упрочнение и создать благоприятное напряжённое состояние поверхностного слоя [28]. В совокупности данные факторы ослабляют тенденцию к образованию и развитию усталостных трещин. Кроме того, обработка ППД затрудняет проникновение поверхностно-активных веществ, находящихся в технологических средах, внутрь материала деталей, что способствует снижению эффекта адсорбционной усталости [38].

Авторы работ [18] 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 [27] 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 [32].

В исследованиях [34, 9] 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.

Положительное влияние обработки изделий методами ППД на износостойкость также подтверждено и зарубежными исследованиями. Рассмотрим несколько исследований целью которых являлось усовершенствование технологии обработки методами ППД для улучшения характеристик поверхностного слоя образцов.

В работах [3, 13] авторы исследовали влияние ППД на износостойкость образцов изготовленных из материала Ti6Al4V за счет оптимизации напряженного состояния. Режимы обработки образцов выбирались по принципу Тагути. В результате авторами было установлено, что комбинации высокой силы и небольшой подачи деформирующего инструмента способствует формированию оптимального комплекса остаточных напряжений, действие которых свою очередь способствует минимизации изнашивания. А комбинации

силы, скорости и подачи в среднем диапазоне величин позволяют минимизировать шероховатость и увеличить микротвердость поверхностного слоя, что способствует уменьшению коэффициент трения.

Р. Херес- Меса и соавторами в своей работе [2,15] проводили исследование влияния модернизированного деформирующего инструмента в виде магнитного шара МАВВ, разработанного для проведения ультразвукового обкатывания деталей. Авторами были потерстированы пять различных стратегий обработки, и вот какие выводы можно сделать: отделочно- упрочняющая обработка образцов магнитным шаром позволяет значительно улучшить качества поверхностного слоя.

- циклоидальные, круговые, зигзагообразные и пошагово- качающиеся стратегии подходят для производства деталей, работающих в условиях трения;
- циклоидная стратегия создает наименьшую шероховатости ( $Ra = 0,064$ ) в обоих направлениях измерения. Обработка деталей инструментов МАВВ при такой стратегии позволяет добиться высококачественной поверхности с низкой шероховатостью и продлить срок службы изделий в целом в 2-3 раза.

И в заключении, хотелось бы отметить научные труды [36]. В работе проводились исследование о влиянии ультразвуковой прокатки на износостойкость образцов из стали Ti6Al4V. Авторы отмечают, что данный вид разновидности методов ППД позволяет значительно улучшить характеристики поверхностного слоя материалов за счет приложения статических и динамических нагрузок. Под действием высокой ударной силы поверхность изделий упруго- пластически деформируется, при этом поверхностная твердость материала повышается, снижается шероховатость и создаются остаточные напряжения сжатия.

Таким образом, проанализировав отечественные и зарубежные исследования, можно сделать вывод, что методы поверхностного пластического деформирования оказывают первостепенное влияние на эксплуатационные свойства деталей ответственного назначения, в частности и коленчатые валы, за счет повышения геометрических и физико- механических характеристик поверхностного слоя. Однако, стоит отметить, что приведенные выше методы ППД имеют ряд недостатков, которые в значительной мере перекрывают достоинства каждого вида обработки:

- Низкая производительность, один из главных критериев, которые оценивается при серийном производстве.
- Использование дорогостоящих оборудований и оснасток.
- Ограниченные технологические возможности, например обработка методом ППД с использованием инструмента, предложенным в статье [29], не позволяет обрабатывать галтели коленчатого вала.

Большинства таких недостатков лишен метод отделочно-упрочняющего обкатывания. Такой вид обработки осуществляется на обычном токарном станке, с деформирующим инструментом в виде шарика и ролика, различной конструкции и профиля, изготавливаемых из сталей марок ШХ15, Р6М5, 9ХС и других, с твердостью 60... 62 HRC. Принцип обработки отделочно- упрочняющим обкатыванием представлен на рисунке 6.

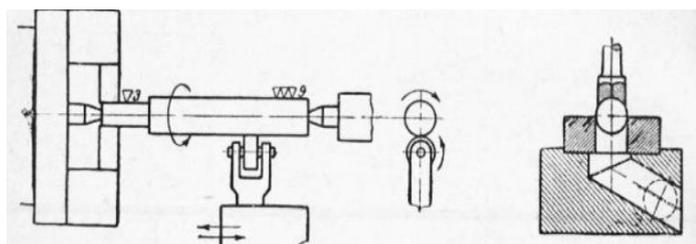


Рисунок 6 – Схема обработки цилиндрических деталей отделочно-упрочняющим обкатыванием [35]

Использование обкатывания в качестве финишной операции изготовления коленчатых валов позволяет добиться 2 класса точности, и высокой чистоты обработки деталей - 7-11 класс.

Во время обкатывания, под действием деформирующего инструмента, происходит деформация поверхностного слоя обрабатываемой заготовки [35]. Преимуществом такой обработки является возможность снижения шероховатость поверхности, увеличение твердости поверхности за счет создания блочной структуры ( путем изменения порядка дислокаций), увеличена коррозионно- и износостойкость изделий, а так же могут быть получены детали с высокой точностью изготовления, при этом, обкатывание не требует огромного количества СОЖ ( смазочно-охлаждающей жидкости), что, в свою очередь, является довольно экологичным способ обработки деталей.

Для коленчатых валов обкатывание применяется в качестве окончательной чистовой обработка, поскольку позволяет достичь высокой точности и низкой шероховатости поверхностного слоя изделий. Обкатывание может быть выполнено, как на обычных токарных станках, так и на токарных станках с ЧПУ, а деформирующий инструмент может быть изготовлен из закаленной стали, карбида, керамики или натурального или искусственного алмаза.

Уменьшение шероховатости поверхности происходит за счет статического контакта между инструментом и поверхностью заготовка, как правило, на глубину  $0,01 \div 0,2$  мм [36]. В процессе изготовления, растягивающие остаточные напряжения, находящиеся в зоне взаимодействия инструмента и заготовки, после обработка  $\phi$  преобразуется в остаточные напряжения сжатия, повышая тем самым усталостную прочность изделий.

#### **1.4. Анализ влияния технологических параметров обработки ППД на остаточные напряжения**

В настоящее время существует достаточное количество методов обработки, позволяющие в определенной степени улучшить качество поверхностного слоя деталей и повысить эксплуатационные характеристики. Однако у большинства методов имеются такие недостатки, как высокая пластическая деформация, малая глубина упрочненного слоя, низкая эффективность неточная траектория обработки [30]. Вследствие чего многие авторы рассматривают различные методы обработки деталей на финишных этапах изготовления.

В работе [30], в качестве метода обработки выбран метод ультразвукового обкатывания. Преимуществом такого метода является простота устройства, контроль за траекторией обработки, а также равномерность обработки деталей.

Принципиальная схема ультразвукового обкатывания представлена на рисунке 7. При наложении ультразвуковых колебаний к деформирующему инструменту в виде шара происходит наложение знакопеременных нагрузок на статические, локальное поглощение ультразвуковой энергии, что способствует при малом статическом усилии сформировать качественный поверхностный слой с оптимальным напряженным состоянием.

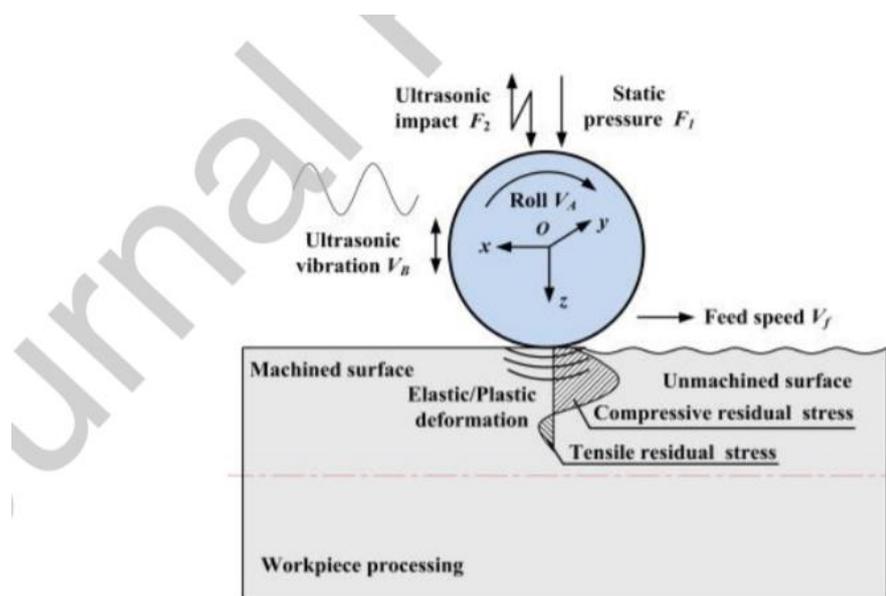


Рисунок 7 – Схема ультразвукового обкатывания [30]

В качестве рассматриваемых параметров на формирование остаточных напряжений были выбраны время обработки, амплитуда ультразвуковых колебаний, статическая нагрузка, прикладываемая к деформирующему инструменту и время обработки.

В результате были получены следующие заключения:

- по мере увеличения амплитуды ультразвуковых колебаний происходит увеличение остаточных напряжений в поверхностном слое, так увеличение амплитуды от 10 мкм до 20 мкм привело к формированию остаточных напряжений величиной от 625 МПа до 945 МПа соответственно.

- Время обработки незначительно влияет на формирование остаточных напряжений, так при постоянных амплитуде колебаний и статической нагрузке, но с изменением времени обработки с 0,045 секунд до 0,065 секунд, напряжения практически не изменяется и колеблется в диапазоне 945 - 948 МПа поверхностное остаточное напряжение заготовки достигает максимального значения 945 МПа.

- Увеличение статического давления способствует увеличению остаточных напряжений в поверхностном слое, так максимальные

остаточные напряжения, соответствующие статическому давлению с величинами 900 Н, 1000 Н, 1100 Н и 1200 Н, составляют 656,2 МПа, 699,51 МПа, 820,1 МПа и 759,16 МПа соответственно.

В статье [33], авторы исследовали влияние алмазного выглаживания на износостойкость образцов ( рисунок 8).

Образцы, изготовленные из стали Ti6Al4V, обрабатывались на токарном станке с ЧПУ с мощностью шпинделя 11 кВт, с максимальной скоростью вращения 4000 об/ мин, в условиях МКС ( минимального количества смазки). В качестве деформирующего инструмента использовался поликристаллический алмаз ( ISO CCMТ09Т304) со скоростью потока смазки 150 мл / ч, скоростью 150 м/ мин и подачей 0,15 мм/ об.

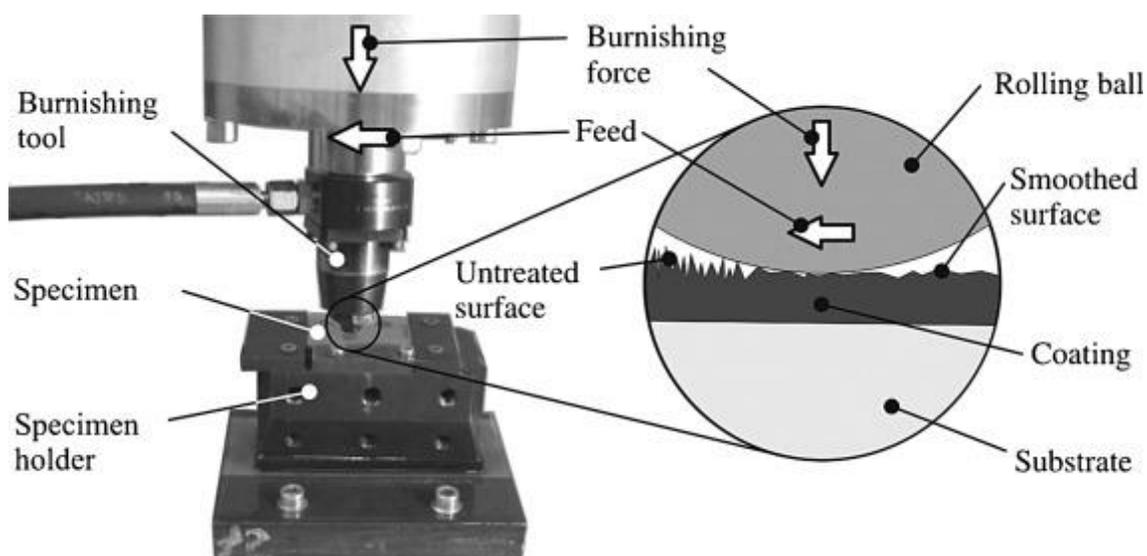


Рисунок 8 – Процесс обработки деталей алмазным выглаживанием [33]

В качестве исследуемых режимов были выбраны 4 технологических параметра, матрица планирования эксперимента представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Матрица планирования эксперимента

№	P, МПа	v, мм/ мин	a, мм
1	10	1000	0,04

2	10	1500	0,06
3	10	2000	0,08
4	20	1000	0,06
5	20	1500	0,08
6	20	2000	0,04
7	30	1000	0,08
8	30	1500	0,04
9	30	2000	0,06

По результатам исследований, авторами было выявлено, что обработка образцов алмазным выглаживанием на режиме № 2, позволяет увеличить микротвердость поверхностного слоя с 340 до 405 HV, уменьшить шероховатость поверхности с 0,45 до 0,12 м, и сформировать остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое с величиной 955 МПа.

Для количественного исследования влияния режимов обработки на износостойкость образцов использовался метод дисперсионного анализа (ANOVA), основанный на отношении S/N. Анализируя полученную сводную таблицу с результатами можно сделать вывод, что в обеспечении высокой износостойкости деталей важнейшая роль отводится силе прижатия инструмента (57.77%) и числу проходов (20.13 %), а вот скорость (13,15 %) и подача (8.95 %) играют незначительную роль в создании качества поверхностного слоя.

Таким образом, на основании литературного анализа и представленных примеров можно однозначно сказать, что рациональный выбор метода и подбор оптимального режима обработки позволяет в значительной мере увеличить качество поверхностного слоя изготавливаемых деталей и существенно увеличить их срок службы.

## 1.5 Релаксация остаточных напряжений в деталях

Выбор рационального метода и режима финишной обработки деталей, с целью продления срока их службы, невозможен без знаний изменения напряженного состояния деталей во время эксплуатации.

На изменение напряженного состояния деталей, в наибольшей мере влияют действующие эксплуатационные нагрузки, которые в свою очередь приводит к структурно- фазовым превращениям, деформационному старению неустойчивых структур, а также к локальной пластической деформации при превышении статического или циклического предела текучести, что снижает остаточные напряжения. Наличие перечисленных факторов и является предпосылкой к образованию релаксационных процессов. При этом стоит отметить, что релаксация под действием внутренним и внешних факторов, начинаются в наиболее нагруженных участках поверхности изделий [17].

Установлено, что релаксация напряжений, может быть результатом как сдвиговодислокационных, так и диффузионных процессов. Релаксация основными процессами которой являются сдвиговодислокационные, характеризуется кооперативным передвижением группы атомов ( по плоскостям сдвигов и т.д.). Релаксация? основанная на диффузионных процессах, характеризуется индивидуальным перемещением отдельных атомов у границ зерен основной структуры или по всему объему поликристалла. Преобладающая роль того или иного явления, контролирующего процесс релаксации, зависит от рабочей температуры и от уровня действующих напряжений [38].

Основная релаксация остаточных напряжений обычно происходит в первом цикле, за которым следует постепенная релаксация в течение всего жизненного цикла изделий [29, 39]. Релаксация во время

первого цикла (« квазистатическая нагрузка») зависит от предела текучести материала при растяжении и сжатии. Последующая релаксация связана с циклическим пределом текучести [20].

На рисунке 9 показана принципиальная схема, описывающая процессы релаксации напряжений. Под релаксационной стойкости материала будем понимать максимальное напряжение, которое не вызывает пластическую деформацию в материале. Таким образом, пластическая деформация, возникающая при релаксации напряжений способствует уменьшению уровня остаточных напряжений и росту релаксационной устойчивости за счет упрочнения материала. При достижении определённой величины релаксации ( предела релаксационной стойкости) остаточные напряжения не вызывают пластическую деформацию, релаксационные процессы прекращаются.

Поскольку остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое деталей оказывают положительное влияние на эксплуатационные свойства изделий, их уменьшение под действием эксплуатационных нагрузок крайне нежелательно. Следовательно, для обеспечения необходимых свойств, определяющих длительность рабочего ресурса и надежность изделий, необходимо при обработке обеспечить устойчивость остаточных напряжений в деталях.

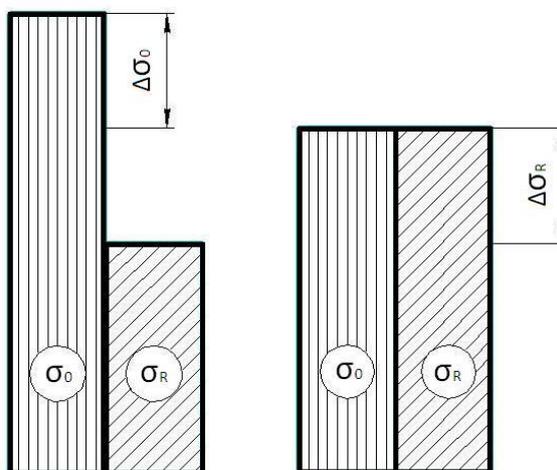


Рисунок 9 – Схема изменений остаточных напряжений  $\sigma_0$  и предела релаксационной стойкости  $\sigma_R$  металла с течением времени

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

Методы поверхностного пластического деформирования являются одним из технологических прием обеспечения стойкости остаточных напряжений в поверхностном слое деталей.

Так, в работе [32] были проведены исследования влияния дробеструйной обработки на релаксацию напряжений. По результатам исследования было выявлено, что обработка методом ППД позволяет существенным образом повысить устойчивость материала к релаксации напряжений за счет формирования тонкой структуры с большим числом равномерно распределенных внутренних барьеров, препятствующих движению дислокаций.

Основываясь на информации представленной в первой главе, можно сделать выводы:

- Трибосопряжение « шейка коленчатого вала – вкладыш» работают в условиях жидкостного трения, для которого характерна минимальная интенсивность изнашивания, но зачастую во время эксплуатации в следствие увеличения скоростного режима, повышения рабочих температур и давления, происходит смена жидкостного трения полужидкостным, при котором возникают более нагруженные участки в месте сближения микронеровностей поверхности, что способствует циклическому изменению уровня рабочих напряжений в микронеровностях и создается условия для усталостного разрушения.
- Износостойкость деталей, в частности и коленчатых валов, во многом зависит от состояния и несущей способности поверхностного слоя материала. При этом в совокупности шероховатость, твердость и остаточные напряжения оказывают колоссальное влияние на эксплуатационные свойства деталей.
- Для оценки влияния остаточных напряжений на износостойкость деталей ответственного назначения необходимо учитывать условия их эксплуатации. Посредством литературного анализа установлено, что остаточные напряжения оказывают положительное влияние на износостойкость только в том случае, если пары трения работают в упругой области деформации и при усталостном изнашивании.
- Анализ отечественных и зарубежных научных трудов позволил установить, что методы пластического деформирования оказывают первостепенное влияние на эксплуатационные

свойства деталей, за счет повышения геометрических и физико- механических характеристик поверхностного слоя. На данный момент существует большое разнообразие методов ППД и комбинация обработки изделий, но при этом каждый из них имеет ряд достоинств и недостатков. Наиболее бюджетным, но не менее эффективным методом обработки является отделочно- упрочняющее обкатывание. Такой метод при подборе оптимального режима обработки позволяет получить поверхность с минимальной высотой микронеровностей, высокой твердостью и благоприятным напряженным состоянием, тем самым способствует увеличению жизненного цикла изделий.

## **Глава 2 Определение роли остаточных напряжений на сопротивление упругопластическим деформациям**

### **2.1 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.

Решение данной проблемы было найдено в работе [37], для определения влияния остаточных напряжений на сопротивление упругим деформациям использовался метод наведения дополнительных напряжений путем упругой деформации деталей. Такой метод позволяет сформировать напряжения разного уровня в поверхностном слое, но при этом оставить 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.

Остаточные напряжения имитировались посредством упругого деформирования за счет запрессовки вставки 1 в обойму 2 с разной величиной натяга ( $\Delta$ , мм) по сопряженным поверхностям (таблица 2). В

результате во вставке 1 были сформированы напряжения сжатия, а в обойме 2 наоборот напряжения растяжения ( рисунок 10).

Таблица 2 – Параметры исследуемых образцов

№ образца	Внутренний радиус обоймы $R_{вн}$ , мм	Наружный радиус вставки $R_{нар}$ , мм	Величина натяга $\Delta$ , мм
1	51,500	51,530	0,250
2	51,040	51,290	0,160
3	51,050	51,230	0,080
4	51,045	51,200	0,058

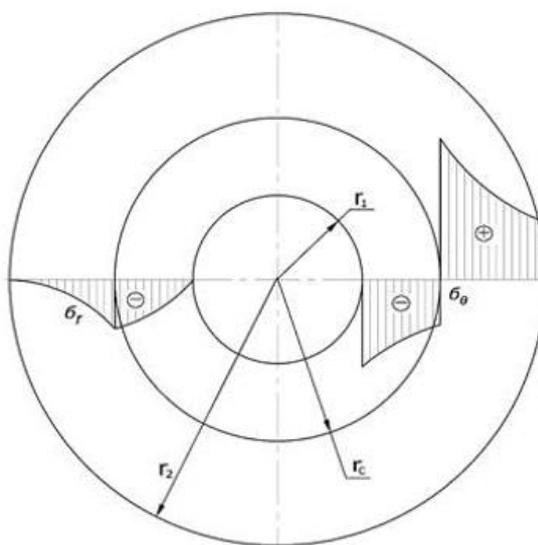


Рисунок 10 – Эпюры распределения напряжений в поверхностном слое образцов

Для расчет дополнительных напряжений в поверхностном слое применяется формула [33] ( таблица 3):

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{E \cdot \Delta \cdot R_{\text{вн}}}{2 \cdot R_{\text{нар}}^2} \quad (3)$$

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).

Таблица 3 – Величина дополнительных напряжений для исследуемых образцов

№ образца	$\sigma_{\text{доп( обойма)}}$ , МПа	$\sigma_{\text{доп( вставка)}}$ , МПа
1	476,757	494,588
2	302,854	317,969
3	152,659	159,165
4	110,043	115,461

Далее на прессе Бринелля [ ГОСТ Р 57172-2016] в поверхностный слой вставки и обоймы образцов вдавливался индентор, с нагрузкой Р прикладываемой перпендикулярно к поверхности образца, нагрузка выдерживалась в течение некоторого времени, после чего образцы разгружались. В результате в поверхностном слое образцов образуются отпечатки разных диаметров ( рисунок 11), которые и являются показателем в какой степени испытываемые поверхности способны оказывать сопротивление прикладываемой нагрузке. Диаметр отпечатка замерялся на микроскопе МПБ – 2.

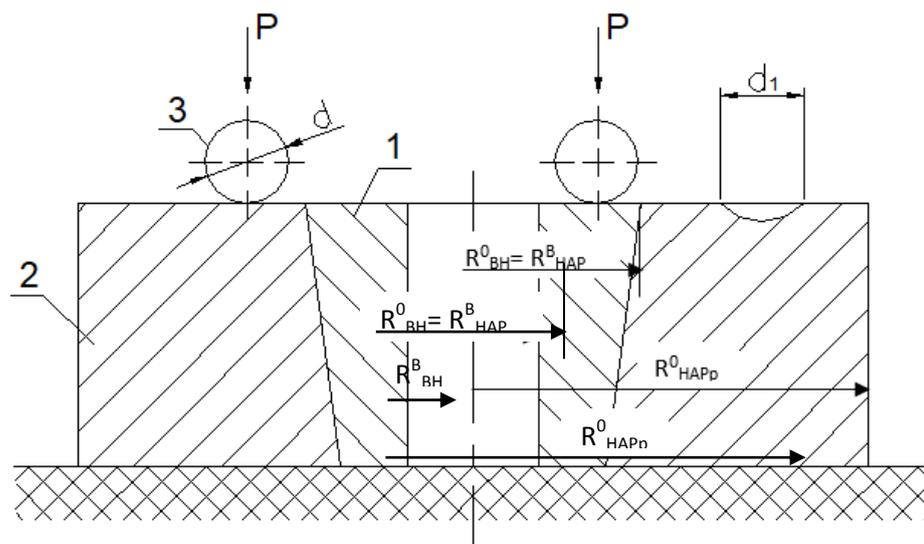


Рисунок 11 – Схема нанесения сферического отпечатка на напряженную поверхность

1- вставка; 2- обойма; 3- индентор

Таблица 4 – Диаметры отпечатка на исследуемых образцах

№ образца	Диаметр отпечатка на обойме	Диаметр отпечатка на вставке
	$d_2, ( \text{мм} )$	$d_1, ( \text{мм} )$
1	6,300	6,000
2	6,300	6,150
3	6,150	6,000
4	6,150	6,050

По результатам исследований были построены зависимости  $d=f(\Delta)$  ( рисунок 13) и  $d=\psi(\sigma_{\text{доп}})$  ( рисунок 14).

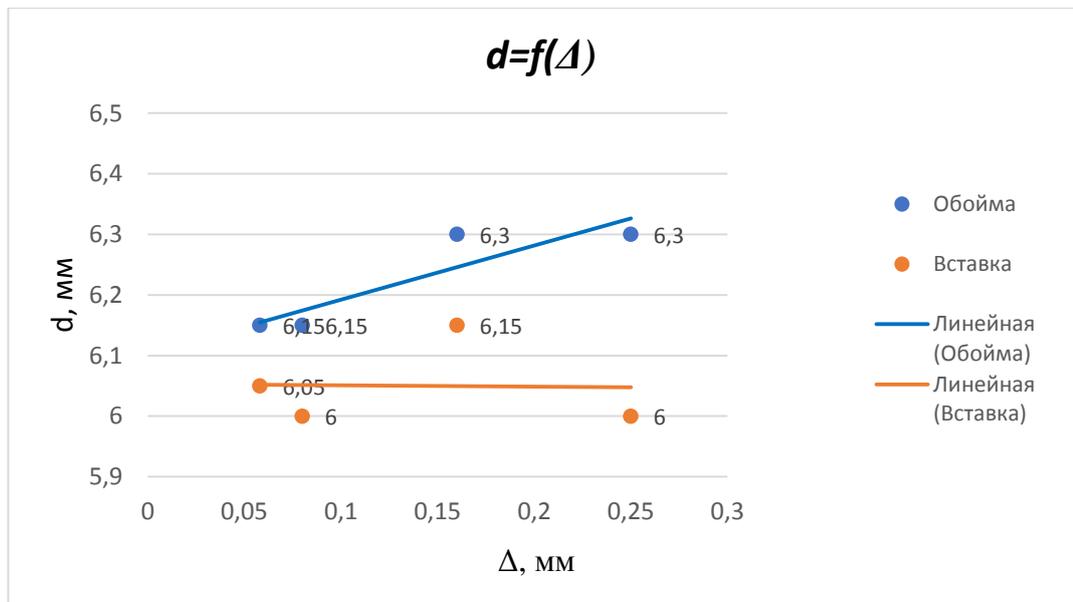


Рисунок 13 – Экспериментальная зависимость диаметра  $d$  отпечатка от величины натяга  $\Delta$

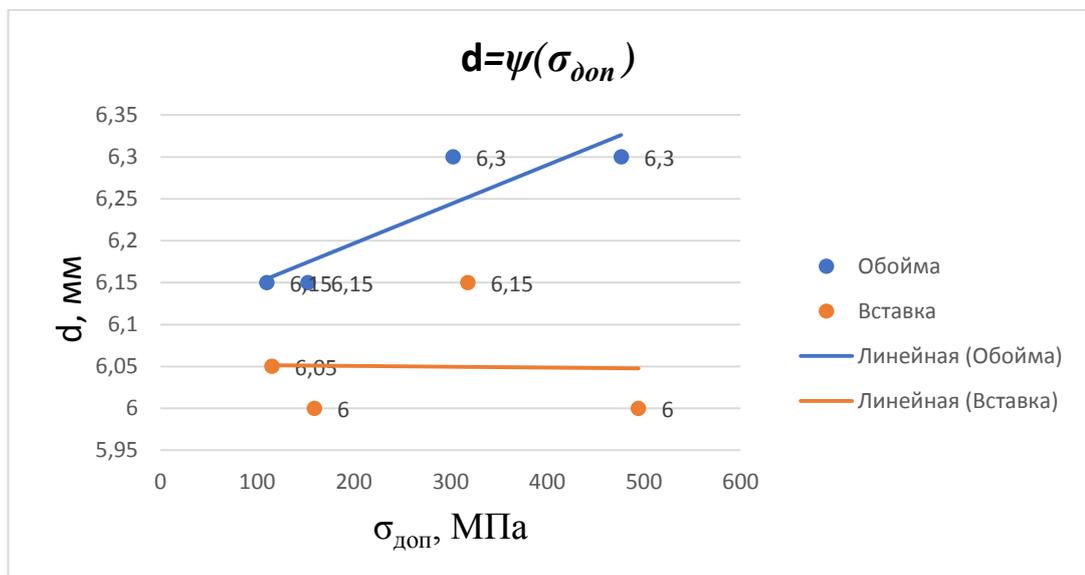


Рисунок 14 – Экспериментальные зависимости диаметра  $d$  отпечатка от величины дополнительных напряжений  $\sigma_{доп}$

Из графиков, представленных выше видно, что величина и знак напряжений в поверхностном слое образцов явным образом влияют на геометрию отпечатка от индентора.

Так, из рисунка 1 видно, что наличие в поверхностном слое напряжений растяжения способствует увеличению диаметра отпечатка, тем больше, чем больше величина натяга. Это объясняется тем, что в поверхностном слое во время запрессовки образуются растягивающие напряжения, которые неспособны оказывать нужного сопротивления упругопластическим деформациям.

И наоборот, в 1 образце под действием запрессовки за счет наибольшей величины натяга возникли напряжения, величина которых составила 495,6 МПа, при этом, после вдавливания, диаметр отпечатка на поверхности составил 5 мм, этот факт указывает на то, что поверхность оказывает значительное сопротивление возникающим упругопластическим деформациям.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что поверхность с наведенными сжимающими остаточными напряжениями способна оказывать противодействие упругопластическим деформациям, что является одним из важнейших критериев при работе трибосопряжения шейки коленчатого вала – вкладыш.

## 2.2 Исследование повышения износостойкости деталей путем изменения силы, приложенной к инструменту, в процессе ППД

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 [19]. При изготовлении коленчатых валов необходимо целенаправленно формировать напряжённое состояние в зависимости от условий их эксплуатации.

При выборе режима упрочняющей обработки необходимо учитывать фактическое напряженное состояние деталей в процессе эксплуатации. Внутренняя сила поверхностного слоя, обусловленная остаточными напряжениями сжатия, способствует « закрытию» усталостных трещин и противодействует сдвиговым деформациям, возникающим при циклическом нагружении деталей. Величина этой силы зависит от интегральной характеристики  $R_n$  их эпюры. Интегральная характеристика  $R_n$  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 предыдущей главе были рассмотрены несколько разновидностей обработки методами ППД, каждый из которых имеет достоинства и недостатки, но главным критерием, который объединяет все эти способ является возможность повышения износостойкости, а следовательно увеличение срока службы деталей в десятки раз. Так для формирования напряженного состояния деталей, был выбран именно этот способ обработки.

В данной работе предлагается управление напряженным состоянием деталей за счет изменения интенсивности деформации в зоне контакта деформирующего инструмента и заготовки. Изменять интенсивность деформации следует с помощью параметров режима обработки.

Распределение остаточных напряжений разделено на три области:

- Область I – слой остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое;
- Область II – слой остаточных напряжений растяжения в верхней части нейтральной оси;
- Область III – слой остаточных напряжений растяжения в нижней части нейтральной оси.

Поскольку область III имеет небольшое значение растягивающего напряжения, влиянием этой области остаточных напряжений на свойства материала можно пренебречь. Наибольшее влияние на эксплуатационные свойства материала оказывают остаточные напряжения в областях I и II. Так, для достижения высокой износостойкости коленчатых валов необходимо подобрать такие параметры режима обработки ППД, которые позволят создать высокие остаточного напряжения сжатия в области I [30].

Основными параметрами обработки, определяющими интенсивность упругопластической деформации в зоне контакта деформирующего инструмента, а следовательно, уровень и характер распределения остаточных напряжений являются сила прижатия, размер деформирующего инструмента и продольная подача.

В последнее время при назначении режимов ППД деталей, преимущественно валов, в качестве критерия достижения максимального уровня усталостной прочности наиболее часто используется интенсивность упругопластической контактной деформации  $i \epsilon$ , которая

в оптимальном варианте на поверхности валов ( $\epsilon_{01}$ ) должна быть близкой по значению к предельной равномерной деформации  $\epsilon_{01}^{\max}$  их материалов, которая определяется по пластической твердости  $HД$  [22]:

$$\epsilon_{01}^{\max} = 245/HД. \quad (4)$$

Величину пластической твердости можно определить по ГОСТ 18835-73, или ориентировочно по эмпирической зависимости  $HД=0,486HB^{1,124}$ , предложенной в работе [28].

### *Другие допущения*

С помощью упрощенной схемы воздействия движущегося сферического инструмента на обрабатываемый материал (рисунок 15) последовательно определяем параметры контактного взаимодействия по оптимальной интенсивности пластической деформации  $\epsilon_{01}$  на поверхности заготовки.

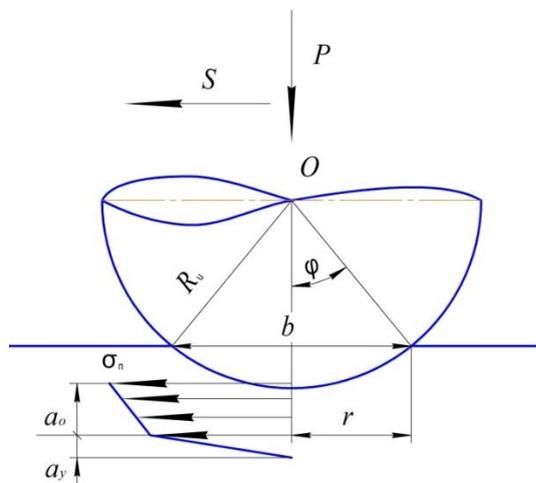


Рисунок 15 - Схема деформирования обрабатываемого материала при обкатывании сферическим инструментом

Величину этой деформации назначаем в соответствии с рекомендациями Д.Д. Папшева [34] по относительной контактной деформации  $\sin\phi$ , где  $\phi$  – угол внедрения инструмента. Параметр  $\sin\phi$ , характеризующий режим упрочнения, задается из диапазона оптимальных значений угла  $\phi$   $5^{\circ}30' - 7^{\circ}$ , который определен по

результатам экспериментальных исследований для различных материалов [34].

Величина среднего давления в контакте заготовки с инструментом, соответствующее пределу текучести обрабатываемого материала, определяется по формуле [42], учитывающей затруднения пластического течения материала при внедрении инструмента:

$$q_T = c\sigma_T, \quad (5)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала;  $c$  – коэффициент стеснения материала.

Значение коэффициента стеснения материала с учетом упрощений, обусловленных малостью углов внедрения инструмента, может быть определено с точностью до 0,1% по формуле [42]

$$c = 2,57 - 0,7 \sin \varphi, \quad (6)$$

Пластическая деформация в зоне контакта возникает по достижении угла внедрения значения  $\varphi_y$ , которому соответствуют напряжения  $\sigma_n$  равные пределу текучести  $\sigma_T$ . Для этого случая на основании уравнения Герца [42] в работах [35, 42] определена связь между упругой деформацией  $\sin \varphi_y$  в зоне контакта и средним контактным давлением  $q$ :

$$\sin \varphi_y = 2 * 10^{-5} q \quad (7)$$

Величина  $\sin \varphi_y$ , характеризующая упругую деформацию материала в контакте подобно относительному удлинению при растяжении, позволяет определить пластическую составляющую  $\sin \varphi_0$  относительной деформации материала  $\sin \varphi$ :

$$\sin \varphi_0 = \sin \varphi - \sin \varphi_y, \quad (8)$$

Учет упрочнения материала при расчете параметров контактного взаимодействия осуществляется с помощью произведения  $K_H a_{упр}$  или касательного модуля  $E_k$ , величина которого определена на основе

эмпирических зависимостей [41] для марочного состава конструкционных сталей с различным значением  $\sigma_T$ :

$$E_k = k_n a_{\text{упр}} 10^4, \quad (9)$$

где  $k_n$  – коэффициент нагружения материала, который по данным [41] находится в пределах 0,45 – 0,46;  $a_{\text{упр}}$  – параметр упрочнения материала.

Значение  $a_{\text{упр}}$  в зависимости от твердости  $HB$  определяется на основании экспериментальных данных М.П. Марковца [42] по аппроксимирующей функции:

$$a_{\text{упр}} = 105,16 HB^{-0,54} \quad (10)$$

С учетом упрочнения материала выражение для расчета среднего давления в контакте, определенное в работе [42], переписывается в виде:

$$q = q_T [1 + k_n a_{\text{упр}} (N^\tau \sin \varphi_0)^f] \quad (11)$$

где  $N$  – число циклов нагружения поверхностного слоя заготовки;  $\tau$  – константа в уравнении Коффина- Мэнсона [42], которая для большинства материалов равна  $\tau = 0,5$ ;  $f = 0,5$  – показатель упрочнения, определенный на основе дислокационной теории упрочнения [42].

Число циклов нагружения в зависимости от ширины  $b$  пятна контакта в направлении подачи  $s$  определяется по формуле В.М. Торбило [40]

$$N = \frac{b}{s} j \quad (12)$$

где  $j$  – число проходов.

Ширина пятна контакта сферического инструмента с цилиндрической заготовкой в направлении подачи определяется из геометрических соотношений схемы деформирования ( рисунок 15):

$$b = 2r = 2R_u \sin \varphi \quad (13)$$

Полученные зависимости позволяют с учетом эллиптичности пятна контакта связать силу  $P$ , приложенную к инструменту, со

средним давлением  $q$  и параметрами пластической  $\sin\varphi_0$  и полной  $\sin\varphi$  деформации материала [42]:

$$P = \pi q_T (1 + k_H a_{\text{упр}} \sin^f \varphi_0) R_{\text{пр}}^2 \sin^2 \varphi \quad (14)$$

где  $R_{\text{пр}}$  – приведенный радиус кривизны инструмента с заготовкой.

Выражение, позволяющее более точно, рассчитать  $R_{\text{пр}}$ , определено в работах [42]:

$$R_{\text{пр}} = 2 \left[ \left( 1 + \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_s}} \right) \left( 1 + \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_v}} \right) \rho_s \rho_v \right]^{-0,5} \quad (15)$$

где  $\rho_s = 1/R_u$  – кривизна, соприкасающихся в зоне контакта инструмента и заготовки в плоскости, проходящей через ее ось;  $\rho_v = 1/R_u + 1/R$  – кривизна в плоскости, перпендикулярной оси заготовки.

Предел текучести  $\sigma_T^*$  материала, повышенный в результате упрочнения, определим из условия деформационного подобия [42]:

$$\sigma_T^* = \sigma_T \{ 1 + k_H a_{\text{упр}} [N^\tau (\varepsilon_{01}^{\max} - \varepsilon_T^*)]^f \} \quad (16)$$

Величину максимальных первоначальных напряжений  $\sigma_{\text{п}}$  на поверхности заготовки  $\sigma_{01}^{\max}$  от силового воздействия инструмента в процессе обкатывания определим по интенсивности пластической деформацией  $\varepsilon_{01}^{\max}$  в соответствии с диаграммой деформирования материала ( рисунок 16), аппроксимированной двойной линейной функцией, у которой углы

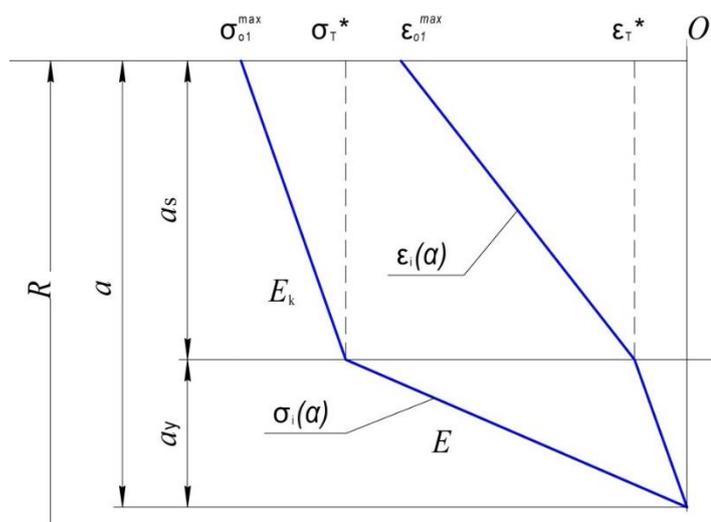


Рисунок 16 - Законы распределения первоначальных напряжений  $\sigma_i(a)$  и деформаций  $\epsilon_i(a)$  в деформированном поверхностном слое

наклона определяются модулем упругости  $E$  и касательным модулем  $E_k$  соответственно для упругой и пластической деформации [27]:

$$\sigma_{01}^{max} = \sigma_T^* + E_k(\epsilon_{01}^{max} - \epsilon_T^*), \quad (17)$$

где  $\epsilon_{01}^{max}$  – накопленная пластическая деформация на поверхности заготовки;  $\epsilon_T^*$  – деформация текучести материала.

Глубину пластически деформируемого слоя  $a_s$  с учетом, что  $R_{пр}$  рассчитывается по (3.13), определим по известной формуле И.В. Кудрявцева [36]

$$a_s = \frac{1}{m} \sqrt{P/\sigma_T} \quad (18)$$

где  $m = 1 + 0,07R_{пр}$  – коэффициент, учитывающий размеры контактной площади.

Глубину упруго деформируемого слоя определим на основании коэффициента восстановления материала  $\eta = \sin\phi_y / \sin\phi_0$  [34,42]:

$$a_y = \eta a_s = \frac{\sin\phi_y}{\sin\phi_0} a_s \quad (19)$$

По рассчитанным параметрам  $\sigma_{01}^{max}$ ,  $\sigma_T^*$ ,  $a_s$ ,  $a_y$  эпюры первоначальных напряжений определим интегральные характеристики начальных напряжений:

$$P_H = \frac{1}{2}(\sigma_{01}^{max} + \sigma_T^*)a_s + \frac{1}{2}a_y\sigma_T^* \quad (20)$$

Зависимости (20), описывающие влияние параметров режима обкатывания на интегральные характеристики начальных напряжений  $P_H$  определим на основе математического аппарата, представленного в работах [32]. В качестве независимых технологических факторов, оказывающих наибольшее влияние на напряженное состояние заготовки, принимаем силу  $P$ , приложенную к инструменту, приведенный радиус кривизны  $R_{пр}$ , и подачу  $s$ , посредством которых имеется возможность оказывать влияние на уровень начальных напряжений. Область изменения каждого фактора выбираем по априорным данным [30] из условия осуществления оптимального режима пластического деформирования.

Для расчета коэффициентов регрессии степенные уравнения (19) при помощи метода выпрямления кривых [39] приводятся к линейным моделям, позволяющими пренебречь эффектами взаимодействия факторов:

$$\begin{aligned} lgy &= lgb_0 + b_1lgx_1 + b_2lgx_2 + b_3lgx_3 \\ lgy_1 &= lgb'_0 + b'_1lgx_1 + b'_2lgx_2 + b'_3lgx_3, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $y = P_H$ ;  $y_1 = e_H$ ;  $b_1 = \alpha$ ;  $b'_1 = \alpha_1$ ;  $b_2 = \beta$ ;  $b'_2 = \beta_1$ ;

$b_3 = \gamma$ ;  $b'_3 = \gamma_1$ ;  $x_1 = P$ ;  $x_2 = R_{пр}$ ;  $x_3 = S$ ;  $b_0 = C$ ;  $b'_0 = C_1$

Коэффициенты регрессии рассчитываются с помощью метода наименьших квадратов [26] по следующим формулам

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n (lgx_{1i} lgy_i) - \sum_{i=1}^n lgx_{1i} \sum_{i=1}^n lgy_i}{n \sum_{i=1}^n (lgx_{1i})^2 - (\sum_{i=1}^n lgx_{1i})^2} \quad (22)$$

$$b_2 = \frac{n \sum_{i=1}^n (\lg x_{2i} \lg y_i) - \sum_{i=1}^n \lg x_{2i} \sum_{i=1}^n \lg y_i}{n \sum_{i=1}^n (\lg x_{2i})^2 - (\sum_{i=1}^n \lg x_{2i})^2}$$

$$b_3 = \frac{n \sum_{i=1}^n (\lg x_{3i} \lg y_i) - \sum_{i=1}^n \lg x_{3i} \sum_{i=1}^n \lg y_i}{n \sum_{i=1}^n (\lg x_{3i})^2 - (\sum_{i=1}^n \lg x_{3i})^2}$$

$$\lg C = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg x_{1i})^2 \sum_{i=1}^n \lg y_i - \sum_{i=1}^n \lg x_{1i} \sum_{i=1}^n (\lg y_i \lg x_{1i})}{n \sum_{i=1}^n (\lg x_{1i})^2 - (\sum_{i=1}^n \lg x_{1i})^2}$$

Потенцируя линейные уравнения (20) и подставляя в них коэффициенты (22) получаем искомые уравнения регрессии (21) для натуральных значений факторов.

Для оценки влияние параметров обработки ППД на образование остаточных напряжений в поверхностном слое деталей были произведены расчеты интегральных характеристик эпюры напряжений в зависимости от режимов обработки. Для расчетов была выбрана три марки стали, наиболее часто используемые для изготовления коленчатых валов.

Матрица планирования представлена в таблице 5, в таблицах 6,7,8 приведены расчетные данные. По полученным расчетам были построены эпюры остаточных напряжений, которые явно отражают зависимость их образования от параметров обработки.

Таблица 5 - Матрица планирования

№	Р, Н	R <sub>пр</sub> , мм	S, мм/ об
1	500	3,548	0,11
2	900	3,548	0,07
3	500	6,554	0,07
4	900	6,554	0,11
5	500	3,548	0,07
6	900	3,548	0,11

7	500	6,554	0,11
8	900	6,554	0,07

Таблица 6 – Расчетные параметры эпюры начальных напряжений для стали 45

№	$\varepsilon_T^*$	$\sigma_T^*$	$\sigma_0^{\max}$	m	$a_s$	$a_y$	$P_H$	$e_H$
1	0,03825	542,708	841,1714	1,24836	0,60868	0,21559	434,4536	0,3157483
2	0,04174	589,349	931,9832	1,24836	0,81662	0,22435	605,9106	0,4012725
3	0,03459	486,511	497,3266	1,45878	0,52088	0,36164	320,5879	0,3489472
4	0,03620	511,420	585,3904	1,45878	0,69883	0,36910	435,7521	0,4218234
5	0,03913	553,127	766,2952	1,24836	0,60868	0,21790	412,1672	0,3225198
6	0,04062	575,815	951,3551	1,24836	0,81662	0,22131	613,1623	0,3990023
7	0,03415	482,856	502,7640	1,45878	0,52088	0,35923	321,4821	0,3475057
8	0,03685	518,059	576,6784	1,45878	0,69883	0,37251	433,4463	0,4240429

Таблица 7 – Расчетные параметры эпюры начальных напряжений для стали 20

№	$\varepsilon^*_T$	$\sigma^*_T$	$\sigma_0^{\max}$	m	$a_s$	$a_y$	$P_H$	$e_H$
1	0,03757	350,66653	657,44208	1,24836	0,75692	0,21282	384,579773	0,366419
2	0,04063	379,24199	806,94982	1,24836	1,01552	0,22076	582,815318	0,460886
3	0,03475	324,32563	383,47151	1,45878	0,64774	0,36187	265,540035	0,395049
4	0,03593	335,30236	469,55393	1,45878	0,86904	0,36746	377,138383	0,478864
5	0,03839	358,27719	646,43784	1,24836	0,75692	0,21524	380,753993	0,368142
6	0,03961	369,66400	822,24529	1,24836	1,01552	0,21792	590,183779	0,458803
7	0,03429	319,99644	388,18808	1,45878	0,64774	0,35919	266,693019	0,393330
8	0,03657	341,28351	462,56792	1,45878	0,86904	0,37085	374,578493	0,481205

Таблица 8 – Расчетные параметры эпюры начальных напряжений для 12X18Н10Т

№	$\varepsilon^*_T$	$\sigma^*_T$	$\sigma_0^{\max}$	m	$a_s$	$a_y$	$P_H$	$e_H$
1	0,042	351,298	815,039	1,248	0,801	0,226	454,78124	0,3636
2	0,047	391,827	1023,645	1,248	1,075	0,237	714,06305	0,4587
3	0,038	314,957	396,696	1,459	0,686	0,377	268,82423	0,4036
4	0,040	330,811	526,820	1,459	0,920	0,386	405,45683	0,4817
5	0,043	361,800	789,922	1,248	0,801	0,229	445,15144	0,3663
6	0,045	378,663	1058,285	1,248	1,075	0,233	732,16305	0,4556
7	0,037	308,812	408,002	1,459	0,686	0,374	272,22803	0,4002
8	0,041	339,181	510,070	1,459	0,920	0,391	398,38305	0,4862

По полученным расчетным данным, с помощью MS EXCEL были определены экспериментальные зависимости интегральных характеристик эпюры начальных напряжений от технологических параметров обработки.

Уравнения регрессии для стали 45 имеют вид:

$$P_n = 26,682 \cdot P^{0,544} \cdot R_{\text{пр}}^{-0,516} \cdot S^{-0,028} \quad (23)$$

где  $P$  – сила прижатия инструмента;

$S$  – продольная подача;

$v$  – скорость обкатывания.

Уравнения регрессии для стали 20 имеют вид:

$$P_n = 13,100 \cdot P^{0,652} \cdot R_{\text{пр}}^{-0,656} \cdot S^{-0,072} \quad (24)$$

Уравнения регрессии для 12X18H10T имеют вид:

$$P_n = 13,337 \cdot P^{0,733} \cdot R_{\text{пр}}^{-0,889} \cdot S^{-0,044} \quad (25)$$

Согласно представленным зависимостям выявлено, что наибольшее влияние на эпюру начальных напряжений оказывает сила прижатия инструмента, в меньшей же степени влияет размер деформирующего инструмента и продольная подача.

По полученным данным были построены эпюры остаточных  $\sigma$  напряжений, из рисунков (17-22) видно, что для стали 45 оптимальными параметрами являются  $P = 900$  Н,  $s = 0,11$  мм/об,  $R_u = 4$  мм при таком режиме на глубин 1,07 ф мкм максимальная величина начальных напряжений составляет 910,478 МПа.

Максимальная величина остаточных напряжений для стали 20 достигается на глубине 1,22 мкм и составляет 782,889 МПа. При этом режим обработки режим аналогичный режиму обработки для стали 40, 12X18H10T  $P = 900$  Н,  $s = 0,11$  мм/об,  $Ru = 4$  мм, позволяет добиться наибольшей площади остаточных напряжений.

Для стали 12X18H10T максимальные напряжения 1009,475 МПа при тех же параметрах достигаются на глубине 1,3 мкм.

Таким образом, в данном разделе представлена методика целью которой является аналитический подбор оптимальных параметров обработки деталей обкатыванием. Полученные результаты были подвергнуты сравнительному анализу с теоретическими результатами Л.Г. Одинцова и Д.Д. Папшева. Значение выбранных сил для различных сталей согласуются с результатами авторов, что дает право отметить, что приведенная выше методика дает адекватные результаты, и может быть успешно применена на практике.

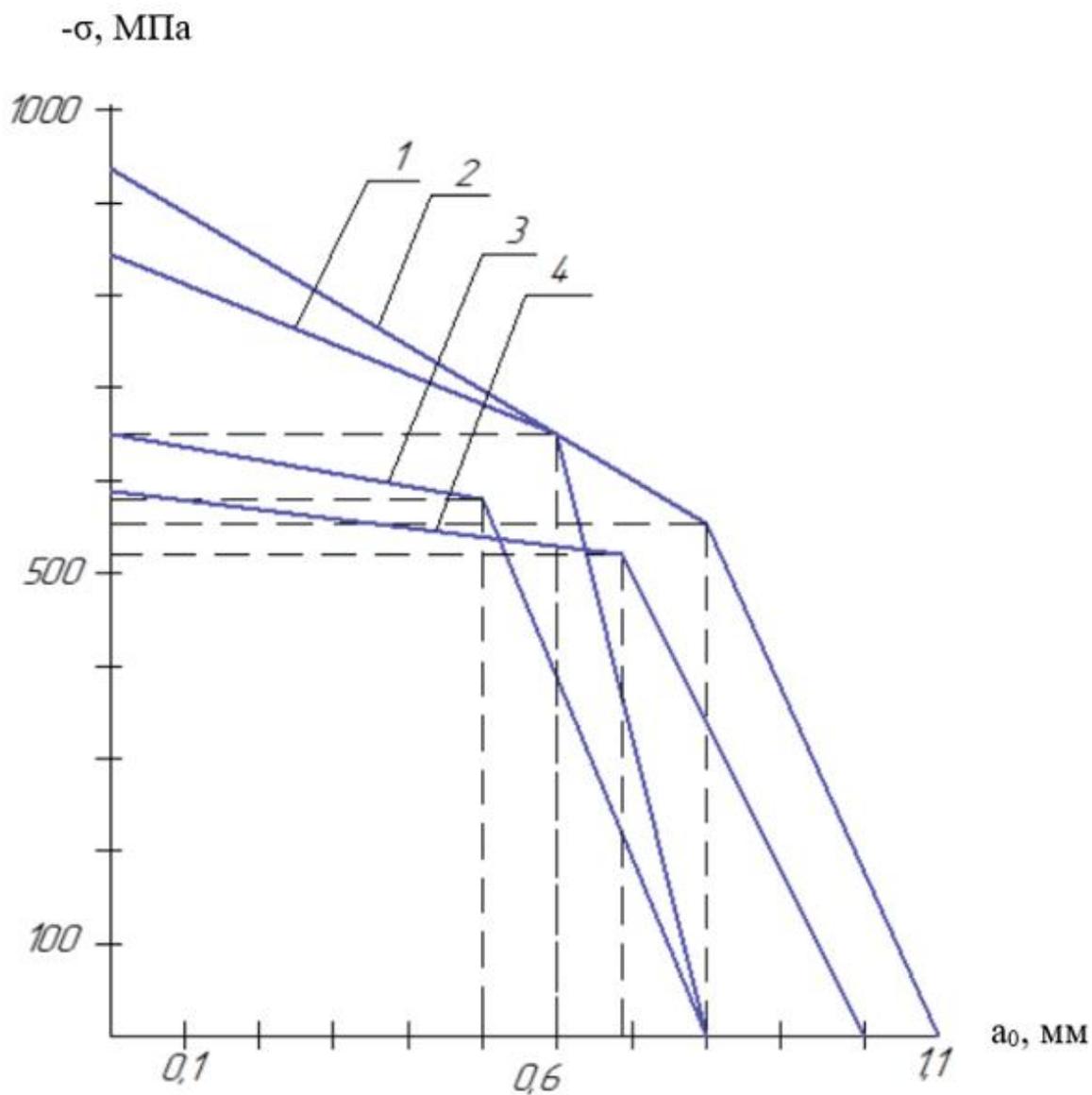


Рисунок 17 – Эпюра начальных напряжений для стали 45

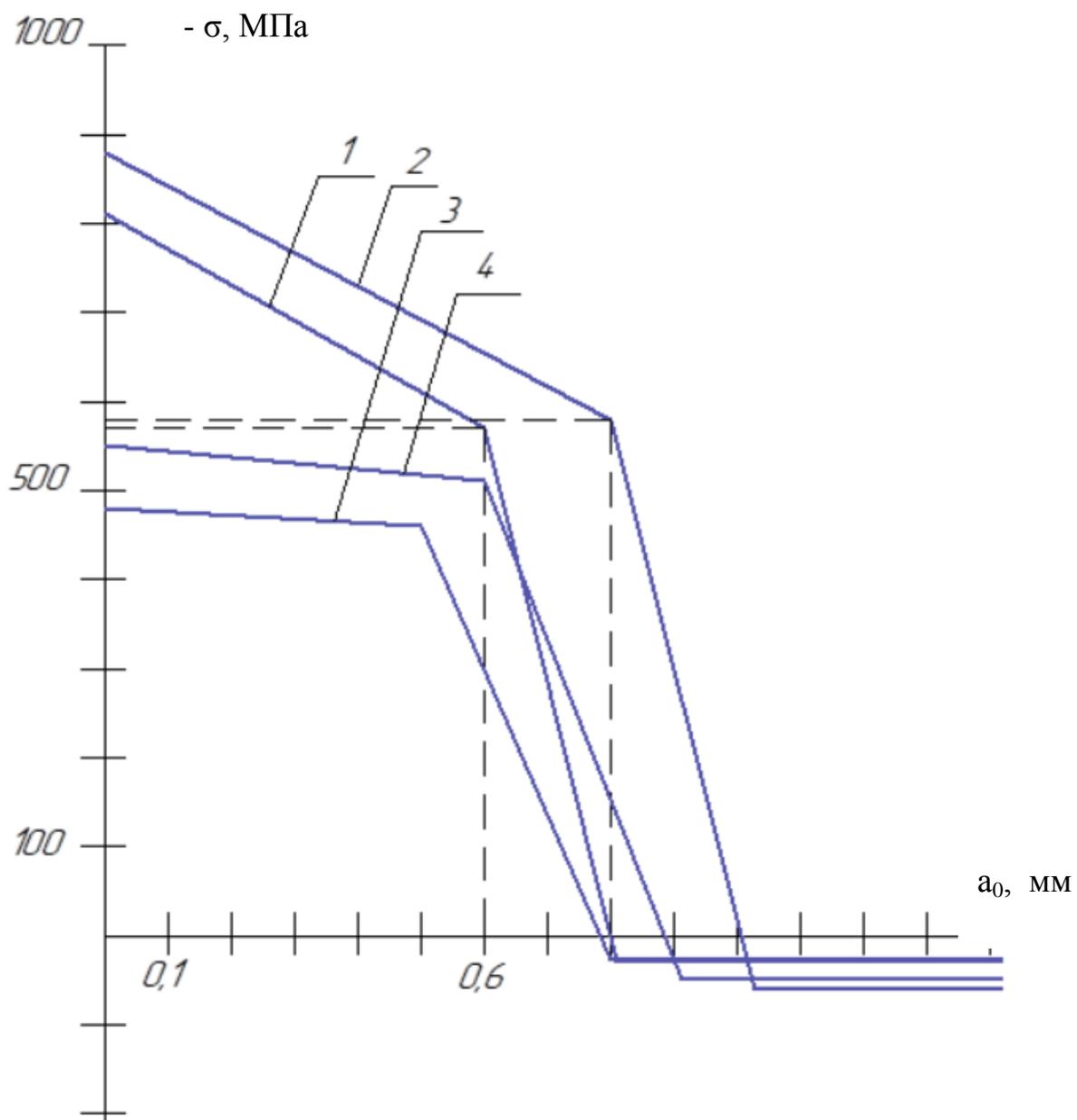


Рисунок 18– эпюра остаточных напряжений для стали 45

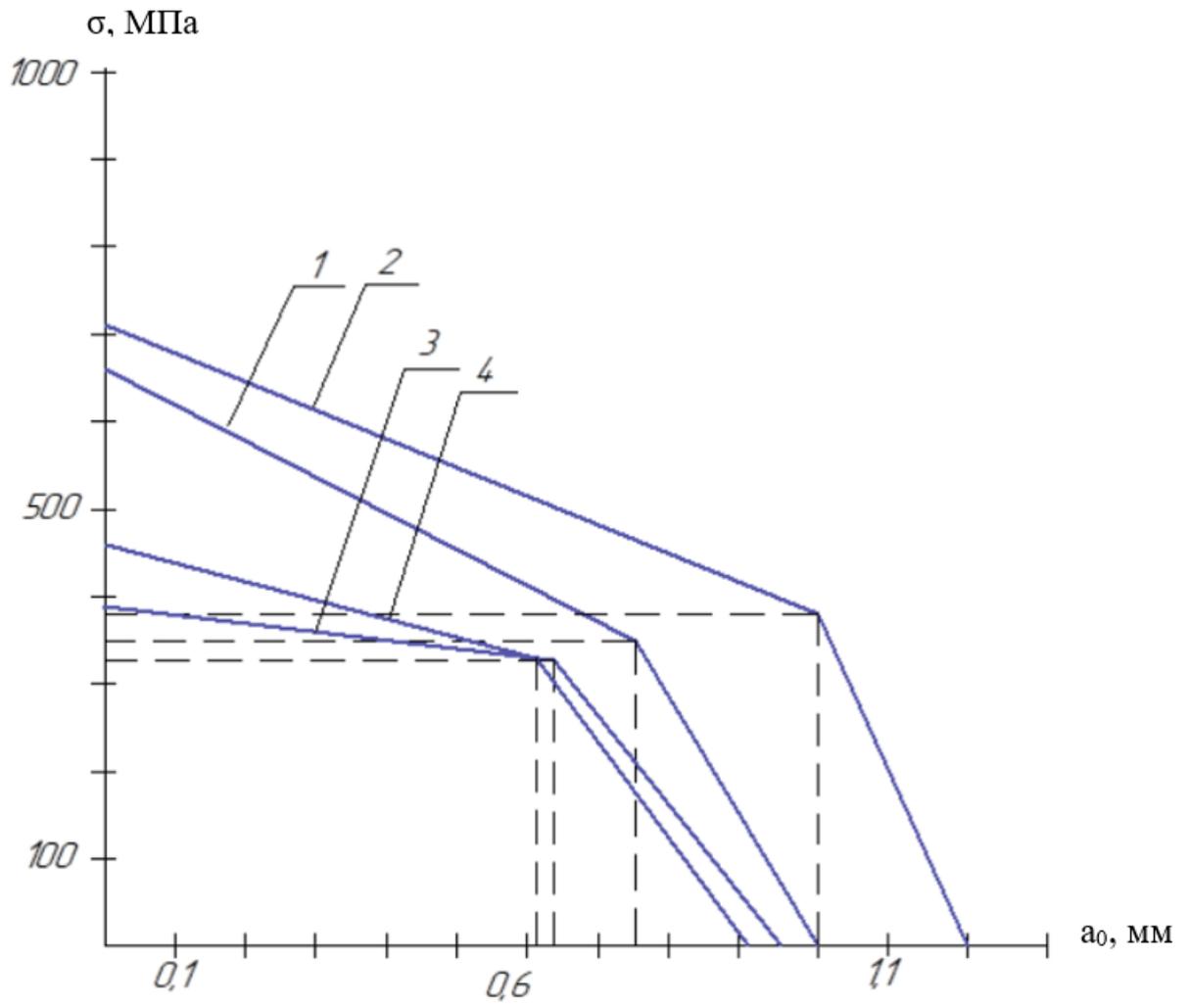


Рисунок 19 – Эпюра начальных напряжений для стали 20

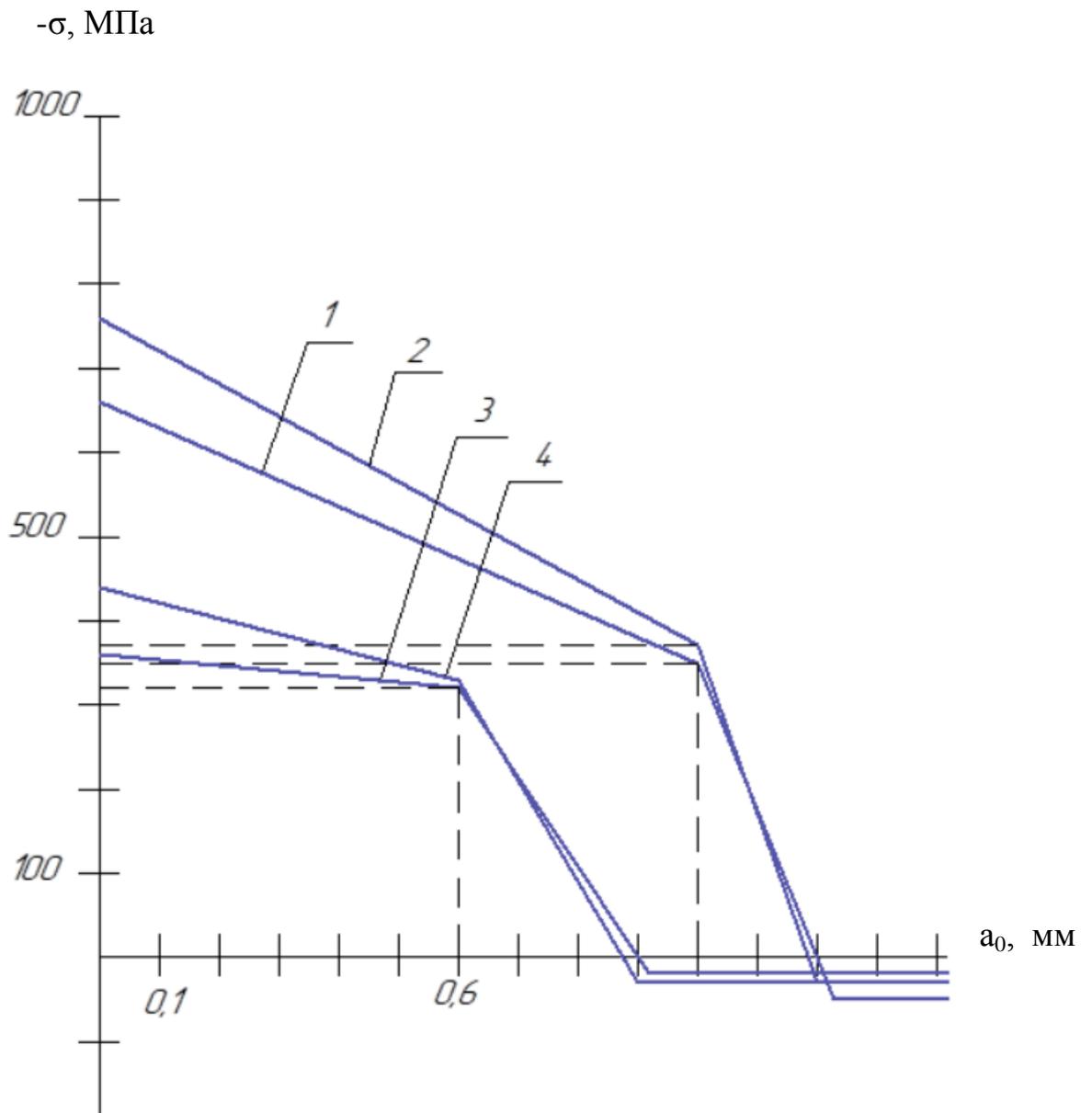


Рисунок 20– Эпюра остаточных напряжений для стали 20

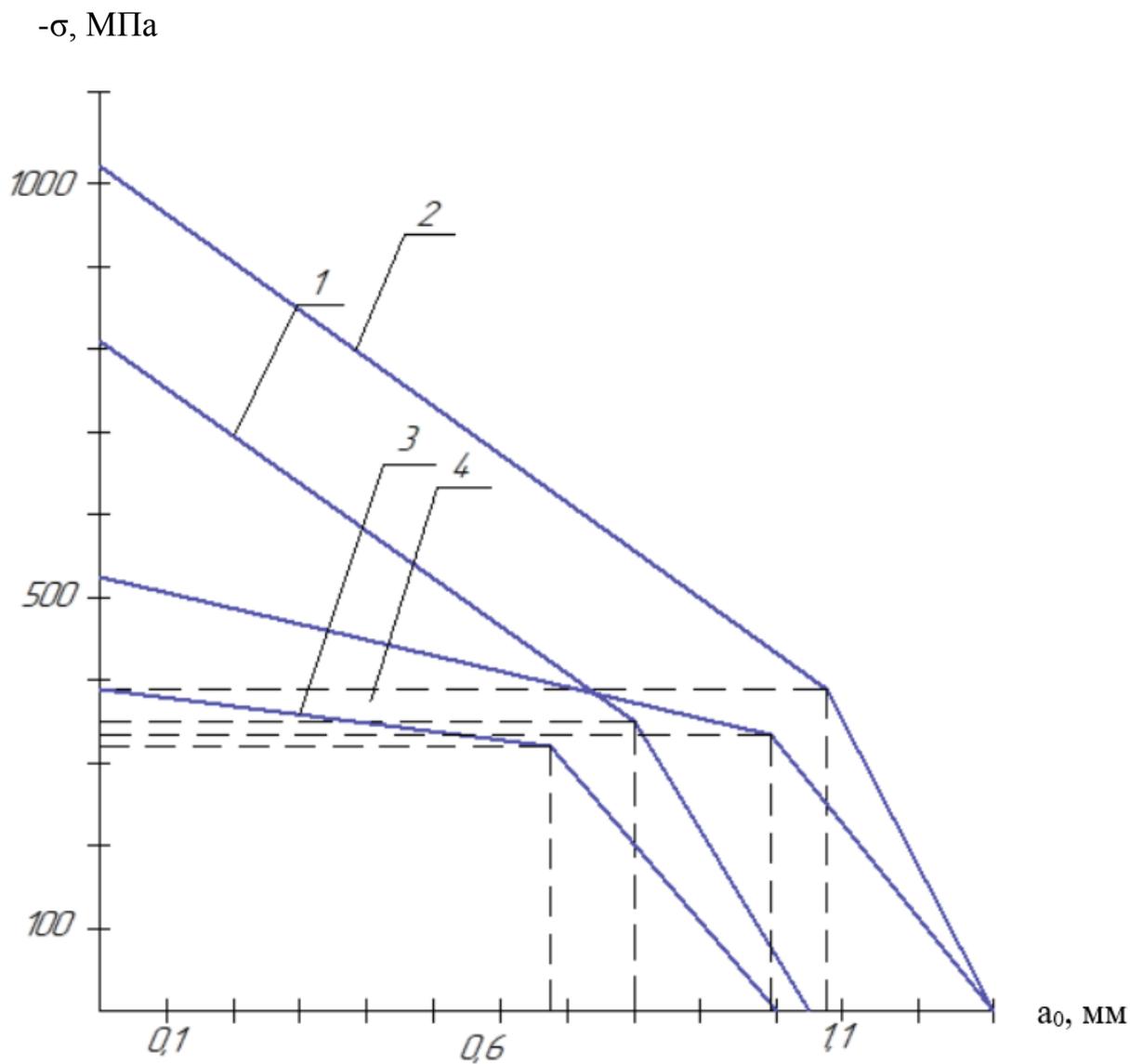


Рисунок 21 – Эпюра начальных напряжений для 12X18H10T

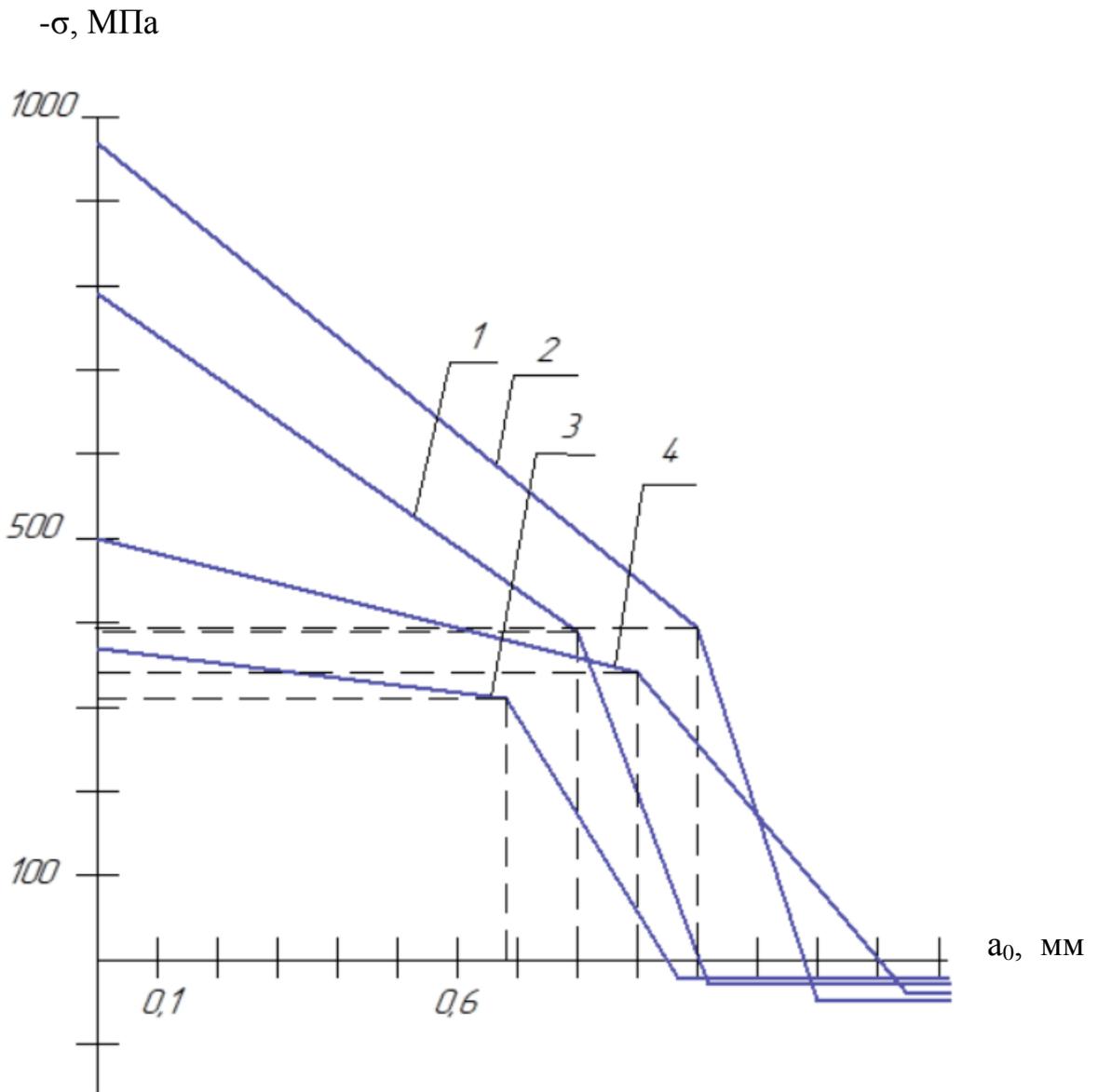


Рисунок 22 – Эпюра остаточных напряжений для 12X18H10T

### Глава 3 Экспериментальное исследование влияния остаточных напряжений на износостойкость

Для подтверждения адекватности прогнозируемых параметров отделочно-упрочняющего обкатывания, предназначенных для формирования определённого уровня и знака остаточных напряжений, было проведено исследование.

Образцы из стали 45, с диаметром  $d = 30$  мм (рисунок), были предварительно отожжённые в вакуумной печи, при температуре отжига  $t_{отж} = 850$  °С, время выдержки  $\tau=30$  мин, и охлаждались вместе с печью со скоростью охлаждения  $u=50^\circ/\text{час}$ . После отжига остаточные напряжения в поверхностном слое образцов были равны нулю.

Измерение параметров шероховатости поверхности после обработки ППД проводили с помощью профилометра MarSurf PS10 Form Talysurf i200. А замер поверхностной твердости образцов проводили с помощью твердомера ТР 5006.

Значение исходной шероховатости перед обработкой составляла  $R_{аисх} = 1,7$  мкм, и исходной твердости  $HRB = 85$ .

Далее образцы были обработаны на токарном станке отделочно-упрочняющим обкатыванием, с использованием смазочной жидкости в виде масла И-40А и деформирующим инструментом изготовленного из стали У10А.

Параметры для обработки были выбраны на основе теоретических расчетов (таблица 9).

Таблица 9 – Режимы отделочно-упрочняющего обкатывания

№	P, Н	$R_{пр}$ , мм	S, мм/об
1	500	3,548	0,07
2	900	3,548	0,11

3	500	6,554	0,11
4	900	6,554	0,07

После обработки ППД, было выявлено, что шероховатость исследуемых образцов уменьшилась в 4-4,5 раза, а твердость в общем на 10-12 %.

Далее в каждом из образцов были определены остаточные напряжения в поверхностном слое с помощью метода Давиденкова Н.Н. Цилиндрические образцы разрезались и подвергались растворению в кислоте последовательными слоями небольшой толщины, с последующим замером диаметра образцы. По полученным данным были построены эпюры остаточных напряжений (рисунок 23).

Теоретические эпюры остаточных напряжений, рассчитанные с использованием разработанной методики для каждого режима обработки представлены на рисунке 18.

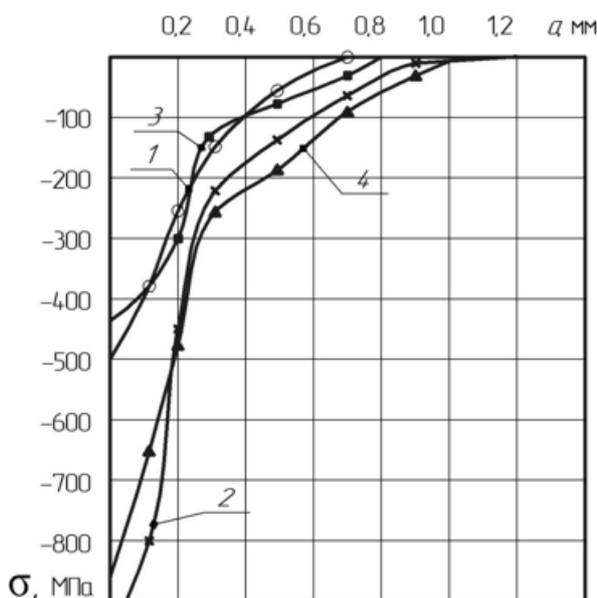


Рисунок 23 - Реальные эпюры остаточных напряжений, полученные в результате эксперимента

Из рисунка 23 видно, что наибольшие остаточные напряжения сжатия достигаются на режиме 2, с параметрами  $P = 900$  Н,  $R_{ш} = 4$  мм,  $S = 0,11$  об/мин, и их величина составляет 800 МПа. По разработанной методике

величина остаточных напряжений составила 860 МПа, что в целом указывает на адекватность разработанной методики.

Далее проводились испытания образцов на износ на машине СМЦ-2 (рисунок 24). Испытание на трение проводилось с использованием смазочной жидкости при различных нагрузках  $P_1 - 1,0$  МПа,  $P_2 - 0,3$  МПа, и частотой вращения 300 об/мин. Величина износа измерялась с помощью гравиметрического метода на весах с точностью до 0,1 мг.



Рисунок 24 – Внешний вид машины СМЦ-2 [30]

По полученным результатам были построены зависимости износа (рисунок 25, 26).

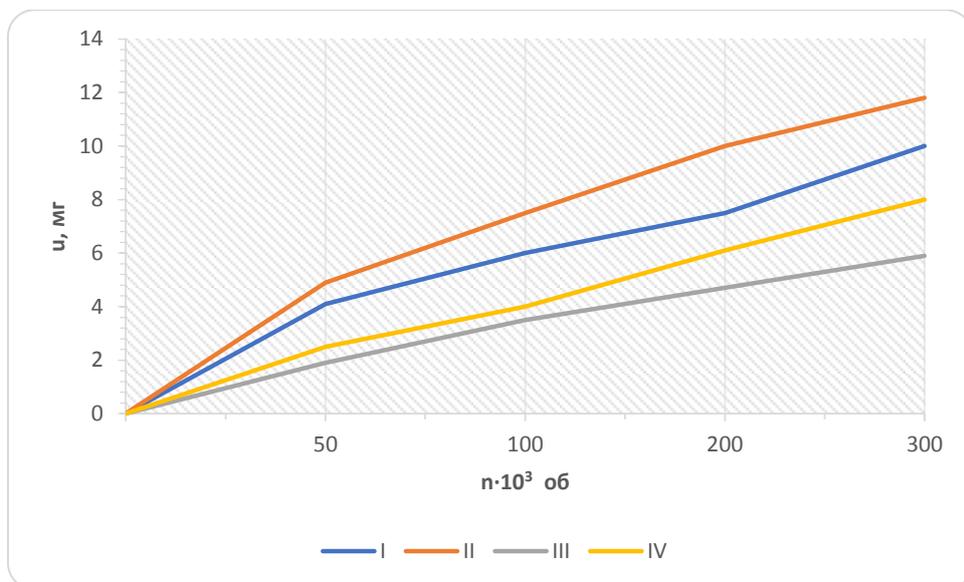


Рисунок 25 – График износа образцов при испытании на трение при нагрузке P- 1,0 МПа

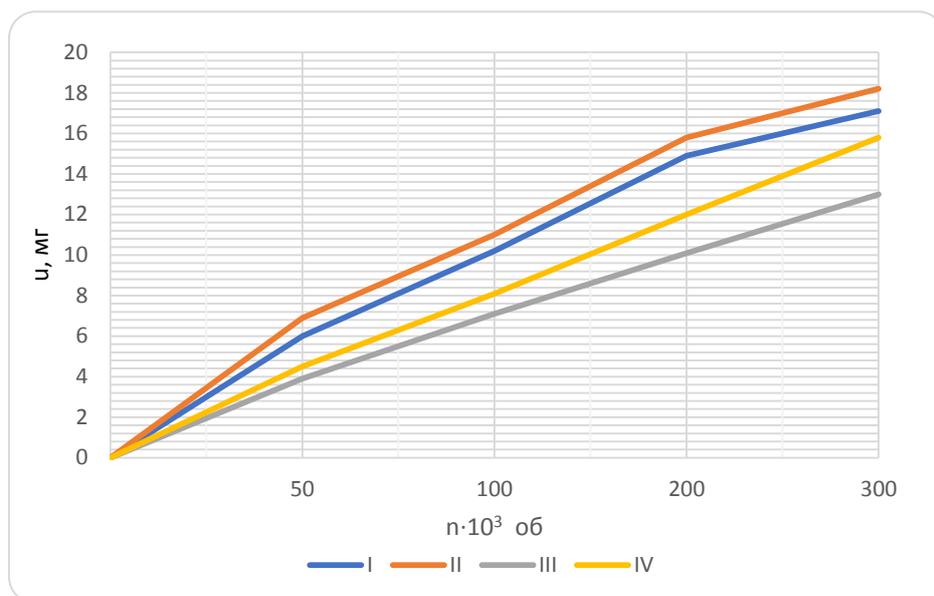


Рисунок 26 – График износа образцов при испытании на трение при нагрузке P- 3,0 МПа

Анализируя зависимости можно сделать вывод, что обработка деталей отделочно-упрочняющим обкатыванием на режиме, который обеспечивает наибольшую эпюры начальных и остаточных напряжений в поверхностном

слое изделий способствует повышению износостойкости деталей в среднем в 2-2,25 раз.

Таким образом, данным экспериментом подтверждена адекватность методики расчета остаточных напряжений и их интегральной характеристики, оказывающей непосредственное влияние на износостойкость.

На основе полученных данных можно сделать вывод, обработка деталей на режимах позволяющих обеспечить поверхностный слой изделий остаточными напряжениями, с наибольшей площадью эпюры остаточных напряжений и в совокупности с другими показателями качества поверхностного слоя, позволяет в значительной мере увеличить износостойкость коленчатых валов.

## Заключение

Общие выводы по работе:

- проведен обширный литературный обзор с целью освещения проблемы повышения износостойкости коленчатых валов. Установлены причины и последствия изнашивания деталей ответственного назначения. Выявлено влияние строения поверхностного слоя деталей на эксплуатационные характеристики;
- рассмотрены несколько методов обработки деталей поверхностным пластическим деформированием, при анализе которых было подтверждено, что на формирование определённых характеристик поверхностного слоя деталей ответственного назначения влияет правильно подобранный режим обработки;
- разработана методика, позволяющая спрогнозировать величину начальных и остаточных напряжений, возникающих в процессе и после обработки деталей методом отделочно-упрочняющего обкатывания;
- на основании разработанной методики получены аналитические зависимости для стали 40, стали 20 и 12Х18Н10Т для расчета силы, прикладываемой к инструменту, с целью обеспечения деталей необходимыми эксплуатационными характеристиками. Построены эпюры начальных напряжений, и для каждой стали аналитическим путем выбраны оптимальные параметры обработки, при которых достигаются остаточные напряжения необходимой величины;
- проведены исследования по определению остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрических образцов, с целью подтверждения адекватности и работоспособности разработанной методики. Проведено сравнение остаточных напряжений, полученных теоретическим и экспериментальным путем, которое показывает, что режим обкатывания с параметрами  $P = 900 \text{ Н}$ ,  $R_{ш} = 4 \text{ мм}$ ,  $S = 0,11$

об/мин позволяет сформировать напряженное состояние в изделиях с наибольшей площадью эпюры остаточных напряжений;

- экспериментальным путем, с помощью испытаний на износ, подтверждена положительная роль формирования остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое образцов. При этом было выявлено, что образцы, в которых после обкатывания были сформированы остаточные напряжения с наибольшей площадью эпюры оказывают наибольшее сопротивление изнашиванию.

## Список используемой литературы

1. Блюменштейн, В.Ю. Инновационные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием в транспортном комплексе // Научные технологии в машиностроении. - 2019. - № 8. С.16-24
2. Борздыка, А.М. релаксация напряжений в металлах и сплавах, методы ее изучения и основные факторы. М.: Металлургия, 1972. – 304 с.
3. Браславский В.М. Технология обработки крупных деталей роликами / Браславский В.М. -М.: Машиностроение, 1975. -160 с.
4. Буркин, С.П. Остаточные напряжения в металлопродукции : учебное пособие / С. П. Буркин, Г.В. Шимов, Е.А. Андрюкова. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, - 2015. — 248 с.
5. Григорьев, А.Л. : Сопротивление материалов: учеб. пособие для студентов / Григорьев А.Л. - М.: ВолгГТУ. Волгоград: 45 с.
6. Денисов А. С. Научные основы формирования структуры эксплуатационно-ремонтного цикла автомобилей, 1999. 428 с.
7. Дрозд М.С., Сидякин Ю.И. О роли линейных и сдвиговых деформаций в упрочнении поверхностного слоя при ее обкатке роликами.// Проблема прочности. -1987. -№ 7. -с. 40-44.
8. Жуков, А.Д. Вариотропия давлений в технологии высокопористых материалов / А.Д. Жуков, А.С. Чукин, А.О. Карпова. - Москва: НИУ МГСУ, 2015. 176 стр.
9. Зайдес С. А. Влияние новой кинематики обкатного ролика на качество упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании / Зайдес С.А., К.К. Нго // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. №2. – С. 58 – 68
10. Зайдес, С. А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин / Зайдес С.А // Новые технологические процессы и оборудование. - 2016. - С. 129-139.

11. Константинов, Л.С. Напряжения, деформации и трещины в отливках // Константинов Л.С, Трухов А.П. М.: Машиностроение, 1981 . - 199 с.
12. Коцюбинский О.Ю., Творогова Р.С., Рубина Е.Э. Правка растяжением стальных заготовок типа стержней // Станки и инструмент. - 1976. -№ 5. -с. 34-35.
13. М.В. Песин. Совершенствование метода обкатки высоконагруженных поверхностей изделий машиностроения / М.В. Песин, И.О. Трепезаева // Металлообработка. -2019. С 1-5.
14. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. / Маталин А.А. -Киев: Техника, 1971. -142 с.
15. Машков, Ю. К. М38 Трибофизика металлов и полимеров: монография / Ю. К. Машков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – 240 с.
16. Мураткин Г.В., Черненко О.С. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки нежестких валов // А.С. 1549734 (СССР). -Опубл. в Б.И. 1990. № 10.
17. Мураткин, Г.В. Повышение надежности коленчатых валов при ремонте двигателей / Г.В. Мураткин, А.А. Дятлов // Ремонт, восстановления, модернизация. 2013. № 5. С.25 – 31.
18. Мураткин, Г.В. Повышение точности нежестких деталей типа валов путем управлений их напряженными состоянием при обработке методами ППД. – Тольятти, 2000. 195 с.
19. Научная библиотека.: Задача Ляме для полого цилиндра [Электронный ресурс]. 2010. URL: [http://sci.alnam.ru/book\\_t\\_upr.php?id=167](http://sci.alnam.ru/book_t_upr.php?id=167)(дата обращения:29.06.2021).
20. Папшев Д.Д. Технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин поверхностным упрочнением: Учебн. пособие. -Куйбышев: КПТИ. 1983. - 81 с.

21. Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием/ Папшев Д.Д. – Изд-во Машиностроение, - 1978. – 103 с.
22. Попова П.В. Исследование влияния технологических остаточных напряжений на сопротивление материала упругопластической деформации. Тольяти, 2019. – 63 с.
23. Радченко, В. П., P15 Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях / Радченко В. П., Саушкин М. Н. М.: Машиностроение-1, - 2005. — 226 с.
24. 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.
25. Торбило В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило - М.: Машиностроение, 1972. -105 с.
26. Чепа П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием / Чепа П.А. -М.: Наука и техника, 1981. - 128 с.
27. Черненко О.С. Расчет геометрических параметров рельефа, образуемого при вибровыглаживании./ Черненко О.С. // Известия ВУЗов. Машиностроение, 1983.-№ 11. -с. 132-136.
28. A. Tange, K. Ano. Improvement of spring fatigue strength by new warm stress shot peening process / A. Tange, K. Ano // Materials Science and Technology. - 2002, - PP – 642.
29. F.J. Humphreys, Recrystallization and related annealing phenomena // Pergamon, International standard ISO 3800:1993(E): Axial load fatigue testing – Test methods and evaluation of results. UK, 2002.
30. Feng W. Experiment and simulation study on influence of ultrasonic rolling parameters on residual stress of Ti-6Al-4V alloy / Feng W, Xiuhua V., Yanjie L., Xiuli F. // Simulation Modelling practice and theory. 2020. P. 15.

31. <https://mash-xxl.info/info/121584/>, дата обращения 04.03.2021 4
32. J. Bergström, Doctorial thesis, Residual stress and microstructural behaviour of a shot peened steel in fatigue/ Linköpin J. Sjöström // Doctoral thesis, Chromium martensitic hot work tool steels – damage, performance and microstructure. Karlstad. - 2004. – PP 76-86.
33. Lipskil, J. Implementation of artificial intelligence in optimisation of technological processes [Text] / J. Lipski1, K. Zaleski // MATEC Web of Conferences 252. - 2019. - PP – 1-6.
34. Mahmoudi, A.H. A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening, [Text] / A.H. Mahmoudi, A. Ghasemi, G.H. Farrahi, K. Sherafatnia, // Materials & Design. – 2016, P. 478-487.
35. N. Iwata, Y. Tomota, K. Katahira, H. Suzuki. Effect of shot peening on fatigue fracture for an as quenched martensitic steel: Materials Science and Technology // Mebarki, P. Lamelse, D. Delagnesand / - 2002. - p. 629.
36. Nowirowsri L.I., Maranchir J.J., Field M. Reduce distortion from grinding and milling operations / Nowirowsri L.I., Maranchir J.J., Field M. // - SAE Journal, - 1967. -v. 69. № 8.
37. Swirad, S. Improvement of the fretting wear resistance of Ti6Al4V by application of hydrostatic ball burnishing [Text] / S. Swirad // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - № 521. - 2019, PP – 1-5.
38. Swirad, S. Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti–6Al–4V) by ball burnishing process [Text] / S. Swirad // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering . - 2019. PP – 1-5.
39. Varga, G. Examination of residual stresses on diamond burnished cylindrical surfaces [Text] / G, Varga,, V, Ferencsik // ISSN 2078-7405. Cutting process and tools in technological systems. - 2017. PP – 18-27.
40. Zhanga, M. Optimum design of compressive residual stress field caused by ultrasonic surface rolling with a mathematical model [Text] / M. Zhanga, Z. Liua, J. Dengc , M. Yanga, Q. Dai, T. Zhanga // Applied Mathematical Modelling. – 2019. – P. 800-831 15

41. [https://studme.org/36380/tovarovedenie/obkатыvanie\\_raskатыvanie\\_po\\_verhnostey](https://studme.org/36380/tovarovedenie/obkатыvanie_raskатыvanie_po_verhnostey), дата обращения 02.07.2021
42. <https://www.lcard.ru/portfolio/tribotest>, дата обращения 03.06.2021