Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ЛЭ ХОНГ КУАНГ

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫПРАВЛЕННЫХ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Специальность 05.02.08 –Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, Зайдес С.А.

Иркутск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

ГЛАВА 1 ИСКРИВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ 13

1.1 Причины искажения геометрической формы нежестких цилиндрических деталей 13

1.2 Напряженное состояние в нежестких цилиндрических деталях 16

1.3 Влияние остаточных напряжений на стабильность геометрической формы деталей машин 21

1.4 Способы и устройства для повышения качества нежестких цилиндрических деталей 26

1.5 Выводы, постановка цели и задач исследования 31

ГЛАВА 2 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ППД И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ 36

2.1 Расчетная модель процесса ППД выправленных деталей 36

2.2 Обоснование вида нагружения и режимов при поперечной правке цилиндрических деталей 42

2.3 Определение условия захвата заготовки гладкими плитами 56

2.4 Определение напряженного состояния в очаге деформации при поперечной обкатке 61

2.5 Определения зоны упругой и пластической деформации при поперечной обкатке 70

2.6 Определение остаточных напряжений в цилиндрических деталях 71

Выводы по главе 2 75

ГЛАВА 3 КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ППД И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАНИНОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ 77

3.1 Метод расчета напряженно-деформированного состояния деталей при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами 78

3.2 Численное определение напряжено-деформированного состояния цилиндрических деталей при ППД 87

3.3 Влияние основных параметров процесса ППД на напряженное состояние и глубину пластической деформации 92

3.4 Влияние характеристики жесткости и материала заготовки на изменение геометрической формы деталей 105

Выводы по главе 3 108

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ППД 110

4.1 Проектирование и изготовление технологического оснащения 110

4.2 Определение остаточных напряжений в деталях после ППД 114

4.3 Определение геометрической точности деталей после ППД 119

4.4 Определение шероховатости поверхности деталей до и после ППД 126

4.5 Определение микроструктуры, микротвердости и глубины наклепа 132

Выводы по главе 4 139

ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ППД ДЕТАЛЕЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКОЙ ГЛАДКИМИ ПЛИТАМИ 141

5.1 Определение износостойкости выправленных деталей 141

5.2 Оценка геометрической стабильности нежестких цилиндрических деталей после ППД гладкими плитами 144

5.3 Определение рациональных параметров процесса ППД гладкими плитами 147
5.4 Проектирование автоматизированного комплекса для повышения качества нежестких цилиндрических деталей 152
Выводы по главе 5 158
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 160
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 163
ПРИЛОЖЕНИЕ А 174
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 176
ПРИЛОЖЕНИЕ В 179
ПРИЛОЖЕНИЕ Г 183
ПРИЛОЖЕНИЕ Д 186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в мире много стран высокоразвитого машиностроения, требующего постоянного повышения точности и качества выпускаемых изделий с одновременным снижением материалоёмкости. В точном машиностроении, приборостроении, инструментальных отраслях используют мелкие нежесткие детали типа валов и осей, которые в процессе изготовления в некоторых случаях претерпевают искажение геометрической формы. Такие детали практически не поддаются правке и их обычно бракуют.

Требованиям снижения материалоемкости отвечает использование нежестких деталей, а в ряде таких областей, как авиация и космос, принципиально применяются только детали малой жесткости. Изготовление последних требует современных технологий, обеспечивающих стабильность геометрических параметров при изготовлении и сохранность их при эксплуатации.

Во время механической обработки и термообработки деталей образуются разные виды остаточных напряжений, поэтому их геометрические параметры и формы изменяются как при изготовлении, так и при последующей эксплуатации. Эта проблема особенно часто проявляется при изготовлении нежестких деталей. До настоящего времени не существует общего решение этой задачи и продолжаются поиски эффективных технологических методов для стабилизации геометрических параметров и одновременного снятия остаточных напряжений или формирования равновесных остаточных напряжений в процессе изготовления нежестких деталей.

В современном машиностроении создаются все более прочные материалы, происходит закономерное снижение металлоёмкости изделий. Вследствие этого сформировался большой класс нежестких деталей широкой номенклатуры: валы, оси, ходовые винты, шпиндели станков, штоки гидроцилиндров и т.д. При этом более половины изделий составляют детали типа валов. Как правило, эти детали ответственного назначения, к которым предъявляются высокие требования по качеству. Одним из важнейших показателей качества изделия, обеспечение которого вызывает значительные трудности, является точность. Одной из проблем, воз-

никающих при изготовлении таких деталей, является искажение их прямолинейной оси. Исследование причины искривления цилиндрических деталей показало, что при их изготовлении возникают остаточные деформации, которые в большинстве случаев превышают существующие допуски на геометрические размеры. Наибольшее распространение получили деформации изгиба (отклонение от прямолинейности оси) и коробление. Для обеспечения прямолинейности цилиндрических деталей в технологический процесс их изготовления вводят операции правки. Правка является традиционным способом восстановления геометрической формы искривлённых деталей.

Степень разработанности проблемы. Исследованиям в области методов повышения качества нежестких цилиндрических деталей посвящены работы отечественных и зарубежных учёных: Я.Д. Вишняков, А.С. Донсков, А. О. Драчев, В.Н. Емельянов, И.В. Кудрявцев, И. И. Манило, Е. Н. Мошнин, Г.В. Мураткин, В.Г. Подпоркин, В.Л. Сахненко, Н.П. Щапов, E. Albert, Hsiao Suei-Tien и других ученных.

В этих исследованиях к настоящему времени получены многие важные результаты в области технологии повышения точности. Усовершенствована методика расчета напряжений и деформаций, определены оптимальные режимы обработки, разработано технологическое оборудование и оснастка. Однако в некоторых случаях распространенные способы правки, например, правка изгибом или растяжением, не дают должного результата. Такие способы правки дают временный эффект, либо приводят к повреждению поверхности, что недопустимо при восстановлении прямолинейности деталей машин [3, 38, 92, 93]. Кроме этого, неравномерность и неустойчивость напряженного состояния деталей после правки служит ограничением для включения этого процесса при изготовлении особо точных конструкций [9, 46, 68].

Достижение заданной точности нежёстких деталей сопряжено со значительными трудностями из–за возникновения технологических упругих и остаточных деформаций.

В связи с этим перспективными являются методы правки деталей, совмещенные с финишной обработкой. В этом направлении самыми перспективными

являются методы правки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). Они позволяют решить одновременно ряд задач: провести собственно правку, снизить шероховатость поверхности и упрочнить поверхностный слой.

Среди разработанных на данный момент методов правки ППД практически отсутствуют способы, которые было бы возможно применять на производстве. Это происходит из-за трудности их внедрения и отсутствия каких-либо расчетных зависимостей.

Для решения вышеизложенных проблем, авторами разработана новая кинематика процесса правки нежестких цилиндрических деталей, позволяющая снижать неравномерность напряженного состояния в деталях машин, а также повышать производительность процесса правки.

Новый способ повышения качества нежестких цилиндрических деталей изгибом при воздействии распределённой нагрузки с последующим упрочнением способом ППД, основанном на поперечной обкатке заготовки гладкими плитами разработан профессором Зайдесом С.А. и аспирантом Лэ Хонг Куангом. Реализация технологии ППД поперечной обкаткой гладкими плитами ограничивается отсутствием эффективной методики прогнозирования формоизменения детали в процессе обработки. Неизвестно напряженное состояние в процессе нагружения изгибом, поперечной обкатки и остаточные напряжения после разгрузки. Также отсутствует технологическое оборудование и оснастка для реализации нового способа повышения качества нежестких цилиндрических деталей.

Данная работа направлена на изучение технологических особенностей процесса повышения качества деталей, определение оптимальных параметров ППД, обеспечивающих необходимое качество изделий, выявление границ рационального использования возможностей предлагаемого процесса ППД, проектирование технологического оборудования и оснастки.

Целью диссертационного исследования является разработка технологии поверхностного пластического деформирования, обеспечивающая геометрическую стабильность и качество поверхностного слоя нежестких цилиндрических деталей после правки поперечным изгибом.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Проанализировать проблемы теории и практики обработки нежестких цилиндрических деталей типа валов, осей, шпилек. Выявить причины нарушения геометрической стабильности цилиндрических деталей после правки поперечным изгибом и разработать мероприятия по их устранению.

2. Разработать и реализовать модель напряженно-деформированного состояния выправленных цилиндрических деталей обработанных поверхностным пластическим деформированием гладкими плитами, позволяющую:

– определить оптимальные параметры процесса ППД, при которых обеспечивается высокое качество поверхностного слоя и высокая геометрическая точность деталей;

– определить напряженно-деформированное состояние в очаге деформации в процессе ППД и остаточные напряжения в готовых изделиях;

– определить влияние физико-механических свойств материала и основных параметров ППД на напряженно-деформированное состояние и качество деталей.

3. Экспериментально определить влияние основных параметров ППД на качество и эксплуатационные характеристики цилиндрических деталей, скорректировать конечно-элементную модель процесса ППД. Определить оптимальные параметры поперечного изгиба и поперечной обкатки, позволяющие получить благоприятную схему напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей.

4. Разработать инструментальное оснащение и технологическое оборудование для проведения технологии ППД гладкими плитами выправленных цилиндрических деталей в лабораторных условиях и спроектировать устройство для реализации предлагаемой технологии в условиях серийного производства.

Объект исследования: поверхностное пластическое деформирование нежестких цилиндрических стальных деталей типа валов и осей.

Предмет исследования: геометрическая точность деталей; напряженное состояние в очаге деформации; технологические остаточные напряжения; каче-

ство поверхностного слоя (шероховатость; микротвердость), геометрическая стабильность деталей.

Научная новизна:

1. Доказано, что новый способ ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей гладкими плитами, приводит к снижению неравномерности напряженного состояния, обеспечивает геометрическую стабильность и повышает качество деталей (п. 2 и 7 паспорта специальности 05.02.08).

2. Получены математические зависимости для аналитических расчетов основных параметров ППД выправленных цилиндрических деталей и определения напряженного состояния в очаге деформации и в готовых изделиях (п. 3 паспорта специальности 05.02.08).

3. Разработана конечно-элементная модель процесса ППД гладкими плитами для определения напряженно-деформированного состояния выправленных цилиндрических деталей. Установлено влияние основных параметров процесса ППД на напряженное состояние нежестких деталей (п. 3 паспорта специальности 05.02.08).

4. На основании экспериментальных исследований и численных расчетов установлено влияние основных параметров и режимов процесса ППД на качество поверхностного слоя и геометрическую стабильность цилиндрических деталей (п. 4 паспорта специальности 05.02.08).

Теоретическая значимость: Определены поля распределения остаточных напряжений в объеме выправленных деталей при поперечной обкатке гладкими плитами. Установлено влияние полей распределения остаточных напряжений на геометрическую стабильность деталей с течением времени.

Разработана кинематическая и математическая модель для определения напряженно-деформированного состояния выправленных цилиндрических деталей при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами.

Практическая значимость.

1. Разработана технология ППД выправленных цилиндрических деталей, обеспечивающая равномерные остаточные напряженные состояния путем попе-

речной обкаткой гладкими плитами. Определены оптимальные режимы ППД, обеспечивающие получение стабильных по геометрии выправленных цилиндрических деталей типа валов и осей с высоким качеством поверхностного слоя.

2. Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка для поверхностного пластического деформирования нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами. Для заготовительного производства предложены конструктивные решения снижающие неравномерность напряженного состояния при выправлении поперечным изгибом цилиндрических заготовок. Для механообрабатывающих производств предложена новая технология отделочно-упрочняющей обработки нежестких цилиндрических деталей выправленных поперечным изгибом. Для изготовления деталей в условиях крупносерийного производства предложен автоматизированный комплекс, обеспечивающий сортировку, поверхностное пластическое деформирование и контроль геометрических параметров цилиндрических деталей.

3. Результаты диссертационного исследования рекомендуются использовать в учебном процессе при проведении занятий по дисциплинам «Технология машиностроения» и «Технология конструкционных материалов», а также аспирантами и научными работниками, занимающиеся вопросами ППД нежестких деталей типа валов и осей.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнены на базе научных основ технологии машиностроения, физики сплошных сред, теоретической механики, теории прочности и упругопластической деформации, механики обработки металлов давлением.

Для моделирования процесса ППД использована компьютерная программа ANSYS Workbench 19. Программный пакет *Microsoft Excel* и *AutoCAD 13* использован для расчетов, создания графиков и чертежей.

Экспериментальные исследования проведены в лабораторных условиях на опытной установке с использованием современного оборудования и устройств измерения:

– машина портальная координатно-измерительная *Carl Zeiss Contura G2*

Aktiv для определения размеров и геометрической точности деталей;

− профилометр *Taylor Hobson Form Talysurf i200* для измерения шероховатости цилиндрических деталей;

− рентгеновский дифрактометр *Xstress 3000 G3/G3R* для определения остаточных напряжений на поверхности деталей;

− микротвердомер *HMV-G21* для измерения микротвердости деталей;

− микроскоп *MET-2* для определения микроструктуры упрочненных деталей.

По результатам выполненных исследований автор выносит на защиту:

1. Функциональная зависимость между силами трения и крутящим моментом при ППД гладкими плитами, которая позволяет установить угол подъема заходной части плитами (от 2^{o} до 8^{o}) и предельную величину относительного обжатия ($Q \leq 4{,}3\%$) в зависимости от величины коэффициента трения (μ).

2. Показатели качества поверхностного слоя цилиндрических деталей: остаточные напряжения; параметры шероховатости поверхности; отклонение от круглости; степень упрочнения зависят от основного параметра процесса – степени относительного обжатия.

3. Результаты определения полей распределения остаточных напряжений в объеме цилиндрического тела, подтверждающие гипотезу о том, что геометрическая стабильность упрочненных деталей зависит от характера распределения остаточных напряжений.

4. Технологические рекомендации по внедрению в производство режимов технологического процесса ППД деталей и конструкцию технологической оснастки.

Достоверность результатов обеспечена обоснованным изучением достаточного объема научной литературы, использованием современных средств и методик проведения исследований, и подтверждается согласованностью теоретических выводов и данными моделирования с результатами их реальной экспериментальной проверки.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы изложены и обсуждены на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях: I Международная научно-практическая конференция «Инновационные

технологии в металлообработке» (г. Ульяновск, ноябрь 2018 г.); VIII, IX Всероссийские научно-технические конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, апрель, 2018–2019 гг.); Научно-практическая конференция с международным участием «Технико-экономические проблемы развития регионов» (г. Иркутск, 20 декабря 2018 г.); Международный семинар «Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» (г. Красноярск, 04-06 апреля 2019 г.); Международная конференция «Агробизнес, экологический инжиниринг и биотехнологии» - AGRITECH-2019 (г. Красноярск, 20-22 июня 2019 г.); XI-я Международная научно-техническая конференция «САМИТ-2019» (г. Курск, 25 октября 2019 г.); а также на расширенном заседании кафедр института Авиамашиностроения и транспорта (ИРНИТУ).

Личный вклад автора. Предложена техническая идея по технологии ППД выправленных цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами, поставлена цель и задачи исследования, реализована методика оценки напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей после поперечной обкаткой гладкими плитами в зависимости от параметров процесса ППД, проведены экспериментальные исследования процесса ППД, выполнен анализ, обработка и интерпретация полученных результатов, сформулированы основные результаты в виде публикаций, выводы и положения, выносимые на защиту.

Публикации. Результаты работы отражены в 24 публикациях. Из них в журналах рекомендуемого перечня ВАК РФ опубликовано 7 статей, в изданиях, включенных в международную базу Scopus – 8 статей, издана одна монография в соавторстве, получено 3 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, библиографический список, включающий 115 наименований, 5 приложений. Общий объем работы – 186 страницы. Основной текст содержит 173 страницы, включая 90 рисунков, 10 таблиц.

ГЛАВА 1 ИСКРИВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Причины искажения геометрической формы нежестких цилиндрических деталей

Нежесткие цилиндрические детали, у которых отношение длины к диаметру более 20 широко применяются в современном машиностроении и в различных отраслях промышленности выпускаются более одного млн. шт./год [11, 52]. Такие детали изготавливают в автомобильной, горнорудной, авиационной промышленности, в станко- и приборостроении, в судостроении, в нефтяном, химическом, сельскохозяйственном, энергетическом машиностроении. В качестве примеров можно привести валы, оси, штоки, буровые штанги, трубы, ходовые винты, цилиндры плунжерных насосов, цилиндрические направляющие, торсионные валы транспортной техники, валы сельскохозяйственной техники, трансмиссионные валы артезианских турбинных насосов, цилиндров амортизаторов и другие подобные детали машин[11].

Постоянство геометрических размеров с течением времени – это один из важнейших показателей, обеспечивающих длительную работоспособность и надежность нежестких цилиндрических деталей. Если детали изменяют даже незначительно размеры с течением времени, то это может привести к недопустимым нарушениям режима эксплуатации. В настоящее время, так же возрастают требования к экономии материала и снижению веса машин. С другой стороны в работе [11] указанная тенденция обусловлена увеличивающейся потребностью промышленности в упругих устройствах, где детали малой жёсткости служат основными звеньями. При этом требуемую прочность и надёжность узлов и агрегатов, включающих нежёсткие детали, регламентируют, как правило, высокой точностью изготовления и взаимного расположения сопрягаемых поверхностей. Таким образом, конструктивное совершенствование и обретение новых функций деталями

данной группы сопровождается проблемой обеспечения заданных требований к постоянству их геометрической формы и качеству.

При изготовлении, хранении и эксплуатации нежестких цилиндрических деталей обычно возникают дефекты их правильной геометрической формы (искривление, скрученность, изменение формы поперечного сечения). Из указанного источника [4] следует, что наиболее характерным и в значительной мере влияющим на работоспособность узлов и агрегатов дефектом, является отклонение от прямолинейности оси. Цилиндрические детали, которые относятся к группе нежестких с отклонением от прямолинейности оси, составляют примерно 65 - 85%. В результате анализа рабочих чертежей деталей установлено, что с увеличением отношения длины (L) детали к её диаметру (D), увеличивается биение и соответственно возрастает требования к точности её изготовления.

Авторами статьей [5, 13, 82] показаны причины искривления нежестких цилиндрических деталей:

– механическое воздействие;

– температурное воздействие;

– релаксация остаточных напряжений.

Искажение формы детали может произойти в результате внешнего упругопластического воздействия. Например, как отмечено в работе Л.А. Васильевых [11], изделия указанного типа могут искривиться в процессе обработки цилиндрической поверхности точением, шлифованием, и т.п. Из-за недостаточной жёсткости детали технологическая система становится крайне податливой к действию сил резания и динамических факторов, обусловленных процессом резания, что и приводит к возникновению погрешностей обработки.

Изделие может получить так называемую остаточную деформацию, в результате нарушения его равновесного напряжённого состояния, обусловленного формированием и перераспределением остаточных напряжений [52, 61].

В процессе редуцирования деформация изгиба может возникнуть из-за потери деталью устойчивости при проталкивании её через рабочее отверстие жёсткой матрицы [25].

Перераспределение внутренних напряжений возможно при удалении неравномерного (асимметричного) припуска. Применительно к цилиндрическим деталям машин, примером такой обработки может служить фрезерование лысок, шпоночных канавок, пазов [47]. Это объясняется тем, что в общем случае обработки вместе с припуском удаляется часть технологически наследственных остаточных напряжений. Уравновешивание внутренних напряжений сопровождается изменением геометрии детали.

Другой причиной коробления изделий являются так называемые начальные технологические напряжения, созданные собственно обработкой детали (под «начальными» напряжениями обычно подразумеваются напряжения в детали после обработки, но до её деформации [52]).

Искажение правильной геометрической формы, появление которого может возникнуть с течением времени, связано с протеканием релаксационных процессов [89]. Вызванные остаточными напряжениями упругие деформации постепенно самопроизвольно переходят в пластические, что сопровождается частичным или полным снятием первичных напряжений. Ускорению релаксации способствуют упругие внешние нагрузки и тепловые воздействия, возникающие в условиях эксплуатации или при хранении изделий [4, 13].

В процессе изготовления валов формируются неуравновешенные остаточные напряжения, которые приводят к искривлению оси и, как следствие, к повышенному биению валов. Ситуация еще более усложняется при изготовлении нежестких цилиндрических деталей, а их в различных отраслях промышленности выпускается более одного млн. шт./год [21].

Для обеспечения прямолинейности цилиндрических деталей в технологический процесс их изготовления вводят операции правки. Правка нежестких деталей - это сложный и трудоемкий процесс, требующий до 20% затрат труда от общей трудоемкости изготовления изделия. При изготовлении нежестких деталей типа валов и осей с отношением длины к диаметру более 20, в технологический процесс изготовления обычно включают несколько операций правки. В настоящее

время известны различные способы правки валов, которые приведены в разделе 1.4.

1.2 Напряженное состояние в нежестких цилиндрических деталях

Долгое время считалось, что формирование технологических остаточных деформаций происходило из-за остаточных напряжений. Такое представление о роли остаточных напряжений вводит в заблуждение, поскольку если остаточные напряжения уравновешены по поперечному сечению, то не могут деформировать деталь не нарушения их равновесия по какой-либо причине (например, неравномерной релаксации, нарушения сплошности и т.д.) [36]. Поэтому, только под воздействием неуравновешенного напряжения может происходить деформация детали. Начальное напряжение следует интерпретировать как неуравновешенное напряжение, возникающее под действием нагрузки в материале заготовки и сохраняемое до тех пор, пока оно не освободится от всех внешних связей и воздействий, т.е. до разгрузки [54]. Начальные напряжения включают в себя:

– неуравновешенные напряжения в заготовке, образованные в процессе обработки вследствие неоднородной упругопластической деформации и неравномерных объёмных изменений материала по сечению детали, возникающих в результате нагрева и структурно-фазовых превращений;

– неуравновешенные напряжения, сформированные из наследственных, т.е. образованных предшествующей обработкой, которые претерпели неравномерное изменение в поперечном сечении при обработке детали на проводимой технологической операции;

– неуравновешенные напряжения образуются наследственными остаточными напряжениями, равновесие нарушается релаксационными процессами.

В большинстве случаев процесс обработки деталей сопровождается так называемой первоначальной деформацией ε_0, приложенной к поверхностному слою и вызывает начальные напряжения $\sigma_н$. Зависимость начальных напряжений от первоначальных деформаций [23]:

$$\sigma_{\text{н}} = -E\varepsilon_0, \tag{1.1}$$

Тип и условие обработки определяют знак и характер распределения начальных напряжений по поперечному сечению детали. В этом случае начальные напряжения в детали может быть выражено как три взаимно перпендикулярных составляющих осевых $\sigma_z^{\text{н}}$, тангенциальных $\sigma_\theta^{\text{н}}$ и радиальных напряжений $\sigma_\rho^{\text{н}}$ первого рода (рис. 1.1).

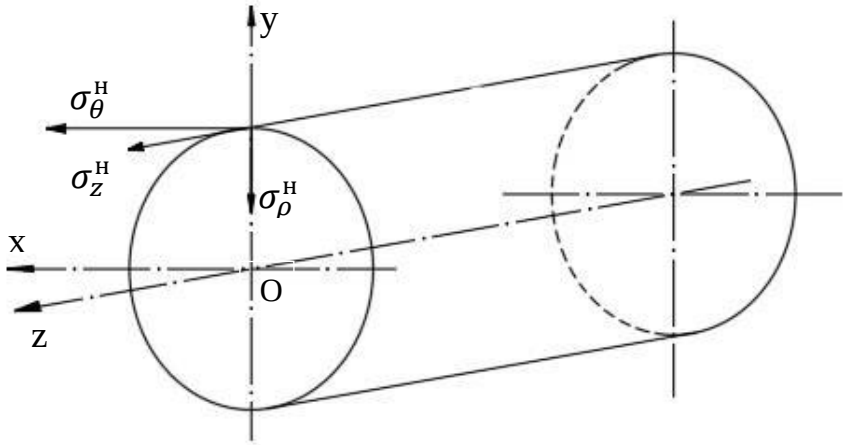


Рисунок 1.1 – Схема ориентации составляющих начальных напряжений

Ориентация компонентов напряжений связана с направлением векторов формирующего движения. В дальнейшем будем рассматривать только напряжения первого рода, поскольку они оказывают существенное влияние на точность и другие эксплуатационные свойства деталей.

После правки, т.е. после снятия всех внешних связей и нагрузок, происходит разгрузка, при которой влияние внутренних сил и моментов, вызванных начальными осевыми напряжениями, в общем случае вызывает изгибную f и продольную деформации Δ. Влияние неравномерных тангенциальных и радиальных напряжений приводит соответственно к закручиванию и искажению формы поперечных сечений. Полученные деформации сопровождаются перераспределением начальных напряжений в поперечном сечении детали. В этом случае равновесные начальные напряжения превращаются в остаточные напряжения, у которых главный вектор и главный момент в сечении равны нулю.

Профессор А.Н. Овсеенко [53] установил зависимость остаточных напряжений от начальных напряжений:

$$\sigma_z^0(x) = \sigma_z^н(x) - \sigma_z^M(x) - \sigma_z^P, \quad (1.2)$$

где $\sigma_z^н(x)$ и $\sigma_z^0(x)$ – соответственно осевые начальные и остаточные напряжения;

σ_z^P и $\sigma_z^M(x)$ – начальные напряжения, которые релаксируют в результате продольной и изгибной деформаций

Из равенства (1.2), согласно которому формирование технологических остаточных деформаций и напряжений представляет собой единый процесс связывания, основанный на формировании и перераспределении начальных напряжений. Это технологические начальные, а не остаточные напряжения вызывают образование остаточных деформаций при отсутствии изменения упруго-напряженного состояния заготовки. Этот факт объясняет, что формирование небольших деформаций не связано с образованием малых по величине остаточных напряжений в теле детали. Точно также в случае возникновения больших остаточных деформаций детали нельзя утверждать, что в ней образовались большие остаточные напряжения. При больших остаточных деформациях эпюра остаточных напряжений, как правило, существенно отличается от эпюры начальных напряжений в направлении снижения. Причем величина остаточной деформации изгиба определяется не уровнем начальных напряжений, а асимметрией их распределения относительно оси заготовки. Кроме того, многие законы распределения начальных напряжений в корпусе детали могут соответствовать определенному значению остаточной деформации изгиба.

Из вышесказанного видно, что процесс формирования технологических остаточных деформаций состоит из двух этапов: формирование деформации при изготовлении деталей; деформации при хранении, транспортировке и эксплуатации изделий. Эти стадии существенно различаются по степени возникающей остаточной деформации.

Поэтому, чтобы правильно выбрать рациональные пути обеспечения и сохранения заданной точности необходимо отличать причины формирования оста-

точных деформаций от причин возникновения несимметричного (неравномерного) распределения по сечению детали начальных напряжений. Так, основными причинами несимметричного распределения начальных напряжений являются:

– асимметричная обработка, связанная с неравномерным удалением технологического припуска, обработкой шпоночных пазов, локальным упрочнением, несимметричным нанесением покрытий, а также правка упругопластическим изгибом и т.д.;

– неравномерное протекание процессов релаксации остаточных напряжений и структурно-фазовых превращений в материале детали в процессе термической обработки или во время хранения, транспортировки и эксплуатации изделия;

Из вышесказанного видно, что формирование искажений, которые остаются при различных технологических воздействиях и после их завершения, происходит по-разному. Но их образование основано на двух основных причинах:

– асимметричное распределение относительно оси детали технологических начальных напряжений;

– изменение в процессе обработки упруго-напряженного состояния заготовки, возникающее перед обработкой при закреплении в станочных приспособлениях или во время обработки под действием технологической оснастки. Последнее происходит, когда заготовка закреплена таким образом, что допускает ее деформацию. Это характерно для случаев, когда изогнутая ось заготовки совмещается с её номинальным положением или когда ось заготовки отклоняется от номинального положения, но при вращении в поперечном сечении не образуются равные по величине знакопеременные напряжения.

Очевидно, что первая причина является доминирующей, поэтому определяет величину и характер изменения пространственной погрешности. Однако можно показать, что обе причины значительно влияют на неравномерность изменения напряженного состояния заготовки. В тоже время прогнозирование технологических остаточных деформаций намного сложнее. Кроме того, как правило, может происходить асимметричное относительно оси детали распределение наследственных остаточных напряжений, что приводит к значительному изменению

напряженного состояния при последующей обработке и поэтому возникают большие технологические остаточные деформации.

При обработке нежестких цилиндрических деталей наряду с геометрическим копированием погрешности формы, вызванных упругими деформациями элементов технологической системы, происходит копирование пространственной погрешности. До последнего времени причиной копирования пространственной погрешности считали остаточное напряженное состояние детали. Оно входит в число отрицательных факторов технологической наследственности, которая снижает точность нежёстких деталей. Действительно, уровень остаточных напряжений в заготовке оказывает решающее влияние на величину технологических остаточных деформаций при удалении больших и неравномерных припусков [17]. Таким образом, были предприняты значительные усилия для уменьшения остаточных напряжений в типичных технологических процессах для изготовления нежестких деталей.

Снижение уровня остаточных напряжений традиционно достигалось с помощью операций термической и вибрационной стабилизации. Это делалось с единственной целью – уменьшение вероятности формирования технологических остаточных деформаций независимо от того, является ли образованные остаточные напряжения благоприятным или неблагоприятным с точки зрения эксплуатационных свойств изделия. В этом случае термические (отпуск, отжиг, нормализация и т.п.) и упрочняющие операции (обкатывание, алмазное выглаживание, обдувка дробью и др.) считали технологическими «барьерами» по аналогичным причинам, ослабляющие влияние напряженного состояния на точность детали. Тем не менее, многочисленные исследования [10, 39] показали, что в большинстве случаев напряженное состояние детали преодолевает технологический «барьер» в виде термической и упрочняющей обработки, увеличивая пространственные погрешности. Этот факт доказывает, что напряженное состояние нельзя считать фактором технологической наследственности, которое отрицательно влияет на точность, поскольку само напряженное состояние не отражает наследственную взаимосвязь остаточных напряжений и деформаций. В связи с этим, по-видимому,

необходимо использовать неравномерное изменение напряженного состояния детали в качестве отрицательного фактора технологической наследственности. Это верно по своей сути, потому что равномерное изменение напряженного состояния детали не приводит к формированию пространственной погрешности и, следовательно, не влияет на точность обработки. Кроме того, этот фактор полностью отражает взаимосвязь между остаточными напряжениями и деформациями и соответствует реальным причинам формирования пространственной погрешности.

1.3 Влияние остаточных напряжений на стабильность геометрической формы деталей машин

Основной причиной изменения формо-размеров изделий является перераспределение в них остаточных напряжений в результате нарушения равновесного состояния в системе остаточных напряжений под влиянием внешнего силового упругопластического воздействия или из-за релаксации напряжений при хранении и эксплуатации [12]. Релаксация остаточных напряжений – одна из основных причин потери изделиями начальной геометрии и размеров. Вызванные остаточными напряжениями упругие деформации постепенно самопроизвольно переходят в пластические, что сопровождается частичным или полным снятием первичных микронапряжений. В связи с неравномерностью протекания релаксации из-за различного уровня остаточных напряжений в различных участках полуфабриката, одни из участков получают большую, а другие меньшую пластическую деформацию. Это приводит к искажению формы изделия и изменению его размеров [12].

Внешние упругие нагрузки и тепловое воздействие в условиях эксплуатации или хранения ускоряют процессы релаксации остаточных напряжений. При температуре 18-20° и напряжениях, меньших критического сопротивления сдвигу, снятие остаточных напряжений идет довольно медленно и может длиться многие месяцы (год и более). При высоких температурах энергия атомов повышается, вследствие чего внутренние микро- и макронапряжений релаксируют быстро.

Смещения атомов происходят в результате диффузии, которая под влиянием остаточных напряжений имеет направленный характер [12].

Диффузионно-пластическому процессу особенно подвержены локализованные микронапряжений и искажения. Отметим, что изменение формо-размеров при релаксации остаточных напряжений в металлических полуфабрикатах обусловливает коробление и поводки, припуски, и в конечном итоге – нерациональное расходование металла. Изменение формо-размеров изделий ведет к нарушению работоспособности узлов и агрегатов, а в результате – к авариям и катастрофам [12, 85].

При изготовлении цилиндрических деталей формируют остаточные напряжения, влияющие на работоспособность цилиндрических деталей, которые работают под воздействием статических и динамических нагрузок, агрессивных сред, и других воздействиях [3]. На рис. 1.2 показаны кривые распределения остаточных напряжений после некоторых технологических операций: при обработке ППД (рис. 1.2, а, б) и термообработке (рис. 1,2, в).

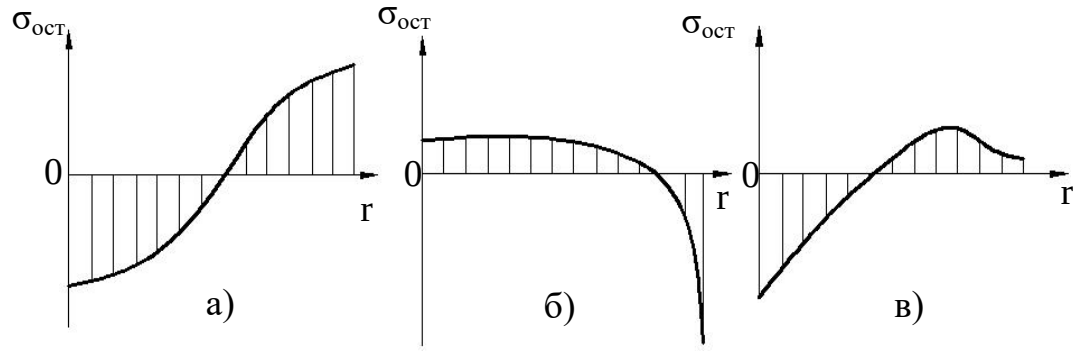


Рисунок 1.2 – Эпюры распределения остаточных напряжений в цилиндрических деталях при: (а) – калибровке, (б) – обкатке роликами, (в) – закалке [24, 82]

Известно, что под действием остаточных напряжений часто сказываются самопроизвольное разрушение ненагруженных или малонагруженных деталей. Влияние остаточных напряжений на прочность при статических и динамических нагрузках изучено на работающих цилиндрических деталях [82]. Если в цилиндрической детали имеются остаточные напряжения, и она нагружается растягивающей силой, то суммарные напряжения получаются алгебраическим сложением

остаточных напряжений и напряжений от внешних нагрузок. В данном случае влияние остаточных напряжений сказывается в преждевременном появлении пластической деформации в наружных волокнах. Если бы на цилиндрическую деталь была бы приложена сжимающая нагрузка, то пластическая деформация началась бы в срединных волокнах. Остаточные напряжения влияют на понижении предела пропорциональности и предела упругости, а в некоторых случаях и условного предела текучести [83].

При предельной нагрузке, когда пластическая деформация распространяется на все сечение, напряжения распределяются равномерно. Величина предельной нагрузки не зависит от остаточных напряжений, т.к. уже при начальной пластической деформации остаточные напряжения были сняты. После снятия нагрузки в цилиндрической детали не будет остаточных напряжений. Следовательно, для пластичных материалов остаточные напряжения практически не влияют на величину разрушающего усилия. В этом случае под пластичным материалом подразумевают такой, в котором $\varepsilon_в > 4\%$, где $\varepsilon_в$ – остаточная деформация, соответствующая пределу прочности материала $\sigma_в$ [82].

При растяжении хрупких материалов малая возможная величина пластической деформации перед разрушением не позволяет нейтрализовать влияние остаточных напряжений. Поэтому при склонности материала к хрупким разрушениям влияние остаточных напряжений может быть весьма значительным. Сопротивление отрыву материала достигается в первую очередь в той области детали, где напряжения от внешней нагрузки накладываются на остаточные напряжения того же знака [82].

При нагружении с большими скоростями, тогда предел текучести повышается до уровня предела прочности материала, наличие остаточных напряжений, имеющих линейный или плоский характер, может привести к уменьшению прочности. Остаточные напряжения, влияющие на характеристики материала при неравномерном напряженном состоянии, например, изгибе, кручении, растяжении изучены и при вращении [82, 83]. Величина предельной угловой скорости для пластичного материала зависит только от свойств материала и не зависит от пер-

воначальной эпюры остаточных напряжений. Характер остаточных напряжений, образовавшихся в результате неравномерной пластической деформации цилиндрической детали при вращении, не зависит практически от исходных напряжений.

Наименее изучен вопрос о влиянии остаточных напряжений на склонность к хрупким разрушениям. Если остаточные напряжения имеют характер всестороннего растяжения, то достаточно приложения небольшого внешнего усилия, чтобы одно из главных напряжений достигло величины хрупкой прочности и наступило бы хрупкое разрушение. Самопроизвольное хрупкое разрушение напряженных цилиндрических деталей после некоторого вылеживания связаны также с действием остаточных напряжений, имевших объемный характер.

В этом случае в качестве внешнего фактора, вызывающего хрупкое разрушение, могут служить колебания температуры или воздействия среды. Начальным очагом разрушения могут быть концентраторы напряжений в виде неметаллических включений, микро-неоднородностей, микротрещин. Остаточные напряжения влияют и на прочность при циклических нагрузках. В настоящее время известно большое количество экспериментальных работ, в которых освещено влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости [83]. Известно, что с увеличением постоянных растягивающих напряжений цикла предел выносливости уменьшается, постоянные сжимающие напряжения, наоборот, в большинстве случаев повышают выносливость. В данном случае под повышением или понижением выносливости понимается увеличение или уменьшение переменной составляющей на пределе выносливости. Исключение составляют только мягкие стали, для которых постоянные сжимающие напряжения, подобно растягивающим напряжениям, уменьшают переменную составляющую на пределе выносливости. Действие остаточных напряжений, аналогично действию постоянных напряжений. При этом растягивающие остаточные напряжения в большинстве случаев меньше снижают усталостную прочность, чем такие же по величине сжимающие остаточные напряжения. Влияние остаточных напряжений зависит от характера напряженного состояния, как в самой детали, так и напряжений от

внешних сил. Влияние остаточных напряжений при изгибе больше, чем при кручении [83]. Остаточные напряжения влияют и на усталостную прочность. Они могут появляться в результате неравномерной пластической деформации, например, наклепа. В этом случае повышаются сжимающие остаточные напряжения и твердость поверхностного слоя.

Наиболее чувствительным является относительное изменение усталостной прочности за счет остаточных напряжений при объемном распределении последних. Наименее эффективными оказываются остаточные напряжения при линейном напряженном состоянии [82]. При неравномерной пластической деформации, так же изменяется усталостная прочность. Например, правка изгибом деталей, получивших коробление в процессе термической обработки. Поскольку правка, как правило, производится методом прогибов, то на стороне детали, подвергавшейся пластическому сжатию, после правки возникают растягивающие остаточные напряжения. Эти напряжения существенно снижают усталостную прочность выправленных деталей [83].

В результате термической обработки остаточные напряжения повышают усталостную прочность в поверхностных слоях. Вместе с положительным влиянием сжимающих напряжений термического характера во многих работах отмечается отрицательное влияние термических растягивающих напряжений. Отмечается также, большее влияние растягивающих остаточных напряжений для образцов с концентраторами напряжений, чем для гладких образцов [82]. Для упругих напряжений, вызванных действием внешних нагрузок и исчезающих при разгрузке, а остаточные напряжения, после того, могут устранить только с помощью пластической деформации, отпуска или старения [44].

Из изложенного, что кроме отрицательного влияния, которое наблюдается в большинстве случаев, остаточные напряжения могут играть и положительную роль [67, 73, 94, 95, 96, 97, 100, 103, 104, 110, 111, 113, 114]. Сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях изделия повышают его износостойкость, прочность и другие характеристики.

В последние годы разрабатываются и выпускаются прокатные станы с напряженной клетью. Такие станы обладают высокими показателями жесткости. Их использование позволяет получать более качественную продукцию, с минимальными допусками и малой толщиной [67]. Известны также случаи изготовления мостовых кранов с предварительным напряжением нижнего пояса с помощью сварки. Остаточные напряжения в нижнем поясе имели знак, обратный напряжениям от внешнего усилия [73].

При изготовлении многих изделий технологический процесс строится так, чтобы в участках, подвергающихся при эксплуатации наибольшему нагружению, создать сжимающие остаточные напряжения с помощью термической обработки или специальными видами механической обработки: обкаткой роликами, обдувкой дробью, чеканкой и др.

Кроме того, сжимающие напряжения создают с использованием методов горячей посадки втулок, матриц для прессования, стволов орудий с несколькими слоями в сечении. Для сосудов, работающих под высоким давлением (а также стволов орудий), создают сжимающие остаточные напряжения пластическим растяжением или приложением высокого давления изнутри.

Из приведенных данных следует, что остаточные напряжения чаще являются вредными, чем полезными. Поэтому для увеличения стабильности деталей, в большинстве случаев рекомендуется снижать остаточные напряжения или формировать равновесные сжимающие остаточные напряжения.

1.4 Способы и устройства для повышения качества нежестких цилиндрических деталей

Для повышения точности цилиндрических деталей применяют в основном правильные прессы, роликовые сортоправильные машины, машины для правки прутков и труб с косорасположенными роликами, растяжные правильные машины. Оборудование выбирается в зависимости от серийности, технических требований и технологии производства деталей.

Холодная правка на прессах. Деталь при этом процессе устанавливают на столе пресса на двух опорах выпуклостью вверх и измеряют величину исходного прогиба. Затем ползуном пресса, движущимся вниз, воздействуют на выпуклость детали, изгибая ее в противоположном направлении и исправляя тем самым ее геометрическую форму.

Холодная правка отрицательно влияет на многие эксплуатационные показатели качества деталей машин, что было отмечено ранее. Поэтому для ответственных деталей холодная правка на прессах категорически запрещена, о чем делается соответствующая запись в технических условиях на деталь [20].

Теоретические исследования вопросов пластического изгиба применительно к его использованию для технологических целей приводятся в монографиях Подпоркина В. Г. [61] и Сахненко В. Л. [70].

Правка прямых валов шариковыми центробежными упрочнителями. При данном способе правки удары наносят по вогнутой поверхности цилиндрической детали. Продолжительность операции 2-3 мин. При этом удается снизить биение деталей до 0,01 мм. Усталостная прочность деталей при такой обработке увеличивается, а биение шпинделей с течением времени не изменяется [21].

Правка прямых валов роликом, катящимся вдоль образующей вала. Искривленный вал устанавливают в центрах токарного станка так, чтобы его вогнутая сторона была обращена к суппорту. В суппорте закрепляют устройство с деформирующим роликом, ось вращения которого расположена перпендикулярно оси вала. На ролике создают силу накатывания и сообщают ролику движение подачи вдоль оси неподвижного вала. В зависимости от величины исходного прогиба вала и силы обработку проводят в один или несколько рабочих ходов, по одной или нескольким близлежащим образующим вала.

В ЦНИИТМАШе разработан способ холодной правки деталей типа вала [1]. Суть изобретения заключается в накатном ролике, переменного профиля. У данного способа имеется несколько недостатков:

- при реализации способа упрочняется только вогнутая поверхность вала;

− на рабочей поверхности вала остается след от ролика в виде канавки с наплывами металла.

− сложная технология осуществления способа;

− обязательным условием способа является равенство диаметров ролика и вала. Поэтому для каждого вала иного диаметра необходимо изготавливать новый ролик;

− нетехнологичная конструкция ролика.

Правка прямых валов накатыванием. Обрабатываемый вал установлен в центрах токарного станка, на суппорте которого установлены два диаметрально противоположных гидроцилиндра (с поршнями одного диаметра) с накатным роликом и опорным роликом. Предусмотрены насосы низкого и высокого давлений. Переключение на подачу масла в гидроцилиндры тем или иным насосом осуществляется клапаном, который управляется переключателем, закрепленным на станине. На валу закреплен кулачок-эксцентрик, воздействующий на переключатель [99].

Достоинство способа заключается в том, что при накатывании выпуклой, и вогнутой поверхностей вала вместе с эффектом правки достигается повышение предела его выносливости. Недостатком способа считается сложная и дорогая конструкция установки, и низкая производительность.

Термомеханическая правка изделий. Данный способ заключается в том, что искривленную деталь закрепляют в печи, и одновременно с термообработкой создают определенное усилие деформирования для устранения исходной кривизны детали [34, 55, 56].

Недостатки данного способа – это низкая точность и скорость правки, высокие припуски для последующей механообработки и большие энергозатраты [87, 88].

Правка растяжением и кручением. Применяется при возникновении дефектов продольного искривления и скручивания. Процесс правки состоит в следующем [48, 49]: деталь закрепляют концами в зажимах и раскручивают для того,

чтоб её торцы пришли в соосное положение. После этого прикладывается растягивающее усилие выше предела текучести.

Недостатки данного способа: 1. Невозможность правки деталей с высокой твердостью, так как зажимные устройства не обеспечивают надежность зажима, и вследствие этого происходит деформация или разрушение концевых участков. 2. Необходимо детали из самозакаливающейся стали перед правкой подвергать термообработке для уменьшения прочностных свойств. 3. Затруднена правка деталей имеющих недостаточную пластичность. 4. Сложная кинематика правильного устройства. 5. Низкая точность правки. 6. В основном данный способ применим для правки алюминиевых сплавов и углеродистых сталей. Достоинства этого способа в том, что у него низкая себестоимость, при правке растяжением у горячекатаных прутков отпадает окалина и в некоторых случаях происходит упрочнение.

Правка поверхностным пластическим деформированием (ППД). В данной работе проведен анализ существующих методов ППД и выявлены основные недостатки рассмотренных способов.

В способе правки ППД с изменением приведенного радиуса кривизны [74] обкатывание вращающегося вала осуществляют роликом, выполненным асимметричным в поперечном сечении. Ролик имеет участок рабочей поверхности с образующей в виде дуги бесконечно большого радиуса и участок, очерченный по радиусу.

Профили большого и малого радиуса расположены диаметрально противоположно. Меньший радиус профиля рабочей поверхности ролика составляет 0,01...0,1 его диаметра. При этом диаметр ролика равен диаметру обрабатываемой детали. В процессе обработки ролику сообщают движение подачи вдоль образующей вала, при этом он поджимается к поверхности детали с постоянной силой. Перед обработкой ролики выставляют в таком положении, чтобы плоскость деформации заготовки совпадала с осью симметрии роликов. При этом участок их рабочей поверхности с профилем малого радиуса находится в контакте с вогнутой, а участок с профилем большого радиуса – с выпуклой стороной вала. В результате поверхностный слой детали с вогнутой стороны будет получать боль-

шую степень деформации, чем с выпуклой стороны. При больших усилиях деформирования обработку производят несколькими роликами.

К недостаткам указанного способа следует отнести смещение относительно плоскости прогиба вала области большей степени наклепа, что приводит к погрешности обработки. Кроме того, при обработке поверхность детали не получает равномерного упрочнения.

В способе правки ППД [80] обработку вращающегося вала осуществляют двумя диаметрально расположенными элементами - деформирующим и опорным, которым сообщают осевую подачу относительно вала, накатывание идет с переменным по окружности вала усилием.

Преимуществами способа является уменьшение трудоемкости обработки за счет автоматического управления усилием деформирования и использования в качестве деформирующих элементов как роликов, так алмазных выглаживателей.

Способ рекомендуется использовать на автоматических станках и в автоматических линиях, так как не требуется дополнительных технических средств для слежения за процессом правки. К недостаткам способа следует отнести сложность реализации силы прижатия инструмента и погрешность обработки, возникающей вследствие неоднородности степени пластической деформации по контуру детали.

При анализе известных способов и устройств для правки цилиндрических изделий было установлено, что в основном разработана технология правки на уровне заготовительного производства. Существующие способы позволяют править заготовки валов. При этом новое остаточное напряженное состояние может превысить по величине исходное или неравновесное.

В этой связи актуальной является разработка способа, который обеспечивают устранение пространственной погрешности нежестких деталей типа валов путем управления их напряженным состоянием. Поэтому оптимальным из рассмотренных способов, на наш взгляд, является способ правки нежестких цилиндрических деталей поперечным изгибом с последующим упрочнением вала способом поверхностного пластического деформирования, основанным на поперечной об-

катке заготовки гладкими плитами [26, 27, 29, 30, 31, 33, 42, 43, 58, 59, 60, 90, 91, 105, 108, 109, 112].

1.5 Выводы, постановка цели и задач исследования

Проведённый анализ литературных источников позволяет сделать выводы о причинах искривления нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей. Эти детали широко используют для изготовления разнообразных изделий в сельскохозяйственной, горнорудной, автомобильной, авиационной промышленности и бытовой технике. Такие детали позволяют не только передавать мощности на большие расстояния (в габаритных пределах машины), но и значительно снижают металлоемкость изделий.

При изготовлении, ремонте, эксплуатации, а в некоторых случаях и при хранении этих деталей образуются разные виды остаточных напряжений, поэтому их геометрические параметры и формы цилиндрических деталей изменяются, то есть искривляются. Особенно это касается нежестких деталей, у которых длина превышает диаметр в 20 и более раз. Проблемы, связанные с искривлением таких деталей, возникают уже на этапе их изготовления. До настоящего времени не существует общего решения этой задачи и продолжаются поиски эффективных технологических методов для стабилизации геометрических параметров и одновременного снятия остаточных напряжений или формирования равновесных остаточных напряжений в процессе изготовления нежестких деталей. При проведении восстановительных операций во время ремонта (например, при наплавке шеек) из-за значительных термических напряжений происходит коробление валов. Поэтому при ремонте и восстановлении нежестких деталей применяют неоднократные операции правки для достижения их заданной геометрической формы.

Вторым важным моментом технологии правки деталей является обеспечение стабильности геометрических размеров и формы. При нарушении равновесия технологических остаточных напряжений детали искривляются и после правки. Холодная правка валов на прессах, которая достаточно широко применяется на

практике, не дает должного эффекта, так как внутренние напряжения не удается полностью удалить, и они заново распределятся, причем временно, и последующее искривление изделий неизбежно. Таким образом, холодная правка на прессах отрицательно влияет на эксплуатационные показатели качества деталей машин. Поэтому для ответственных деталей холодная правка на прессах категорически запрещается, о чем делается соответствующая запись в технических условиях на деталь.

И третьим немаловажным вопросом технологии изготовления и ремонта деталей является обеспечение качественного состояния поверхностного слоя. Именно внешний слой деталей находится в контакте с ответной деталью или в контакте с окружающей средой, именно в этом слое возникает концентрация напряжений, происходят процессы усталостного нагружения, контактного разрушения и другие виды повреждений.

Для решения вышеизложенных проблем, авторами разработан новый способ ППД нежестких цилиндрических деталей после правки поперечным изгибом, который обеспечивает не только высокую геометрическую точность цилиндрических деталей и стабильность формы и размеров, но и высокое качество поверхностного слоя. Реализация технологии правки поперечной обкаткой гладкими плитами ограничивается отсутствием эффективной методики прогнозирования формоизменения детали в процессе обработки. Неизвестно напряженное состояние в процессе нагружения изгибом, поперечной обкатки и остаточные напряжения после разгрузки. Также отсутствует технологическое оборудование и оснастка для реализации нового способа правки нежестких цилиндрических деталей.

Выполненный литературный обзор, представленный в вышеизложенных подразделах, показывает, что технологические процессы повышения качества нежестких цилиндрических деталей и теоретические вопросы, связанные с правкой ППД, достаточно хорошо изучены в работах известных ученых. Анализ исследований по технологии правки позволяет сделать следующие выводы:

1. Качество нежестких цилиндрических деталей оценивается по способности стабилизации геометрической формы и по формированию равномерных остаточных напряжений.

2. Проблема формирования равновесных остаточных напряжений и стабилизации геометрической формы новых и восстановленных деталей весьма актуальна. Остаточные напряжения оказывают значительное воздействие на точность формы и размеры детали, снижают её эксплуатационную стойкость. В результате релаксации остаточных напряжений форма детали может искажаться в различных направлениях, вплоть до появления трещин и разрушения. Кроме отрицательного влияния, остаточные напряжения могут играть и положительную роль. Сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях изделия повышают его износостойкость, прочность и другие характеристики.

3. Для достижения требуемой точности геометрической формы цилиндрических деталей в технологические процессы их изготовления и сборки включают одну или несколько операций правки. Обычно применяют холодную правку на прессе, но она имеет существенные недостатки и её использование в ответственных случаях запрещено.

4. Установлено, что известны способы правки ППД, позволяющие решить одновременно ряд задач: провести собственно правку, снизить шероховатость поверхности и упрочнить поверхностный слой. Но основным недостатком всех вышеуказанных методов ППД является их низкая технологичность, что является барьером на пути их широкого внедрения в производство.

5. Перспективным направлением для повышения качества нежестких цилиндрических деталей является правка поперечным изгибом с последующим упрочнением способом ППД, основанным на поперечной обкатке заготовки гладкими плитами, принципиальную схему которой предложил профессор С.А. Зайдес. Для практической реализации процесса необходима разработка теории и технологии, оборудования и оснастки, определение оптимальных режимов технологического процесса правки и оценка границ его применения. Из принципиальной схемы ППД предполагается, что данным способом можно не только повысить

геометрическую точность, но и одновременно формировать равновесные остаточные напряжения и улучшить качество поверхностного слоя цилиндрических деталей. Для подтверждения этого предположения необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования.

Целью диссертационного исследования является разработка технологии поверхностного пластического деформирования, обеспечивающая геометрическую стабильность и качество поверхностного слоя нежестких цилиндрических деталей после правки поперечным изгибом.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Проанализировать проблемы теории и практики обработки нежестких цилиндрических деталей типа валов, осей, шпилек. Выявить причины нарушения геометрической стабильности цилиндрических деталей после правки поперечным изгибом и разработать мероприятия по их устранению.

2. Разработать и реализовать модель напряженно-деформированного состояния выправленных цилиндрических деталей обработанных поверхностным пластическим деформированием гладкими плитами, позволяющую:

– определить оптимальные параметры процесса ППД, при которых обеспечивается высокое качество поверхностного слоя и высокая геометрическая точность деталей;

– определить напряженно-деформированное состояние в очаге деформации в процессе ППД и остаточные напряжения в готовых изделиях;

– определить влияние физико-механических свойств материала и основных параметров ППД на напряженно-деформированное состояние и качество деталей.

3. Экспериментально определить влияние основных параметров ППД на качество и эксплуатационные характеристики нежестких цилиндрических деталей, скорректировать конечно-элементную модель процесса ППД. Определить оптимальные параметры поперечного изгиба и поперечной обкатки, позволяющие получить благоприятную схему напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей.

4. Разработать инструментальное оснащение и технологическое оборудование для проведения технологии ППД гладкими плитами выправленных цилиндрических деталей в лабораторных условиях и спроектировать устройство для реализации предлагаемой технологии в условиях серийного производства.

ГЛАВА 2 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ППД И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

С использованием математического аппарата, основанного на законах теории упругопластического твердого тела возможно определение основных параметров процесса ППД поперечной обкаткой гладкими плитами и напряженного состояния цилиндрических деталей. На основе теории упругопластических деформаций, теоретической механики рассмотрены условия для выполнения технологии процесса ППД.

2.1 Расчетная модель процесса ППД выправленных деталей

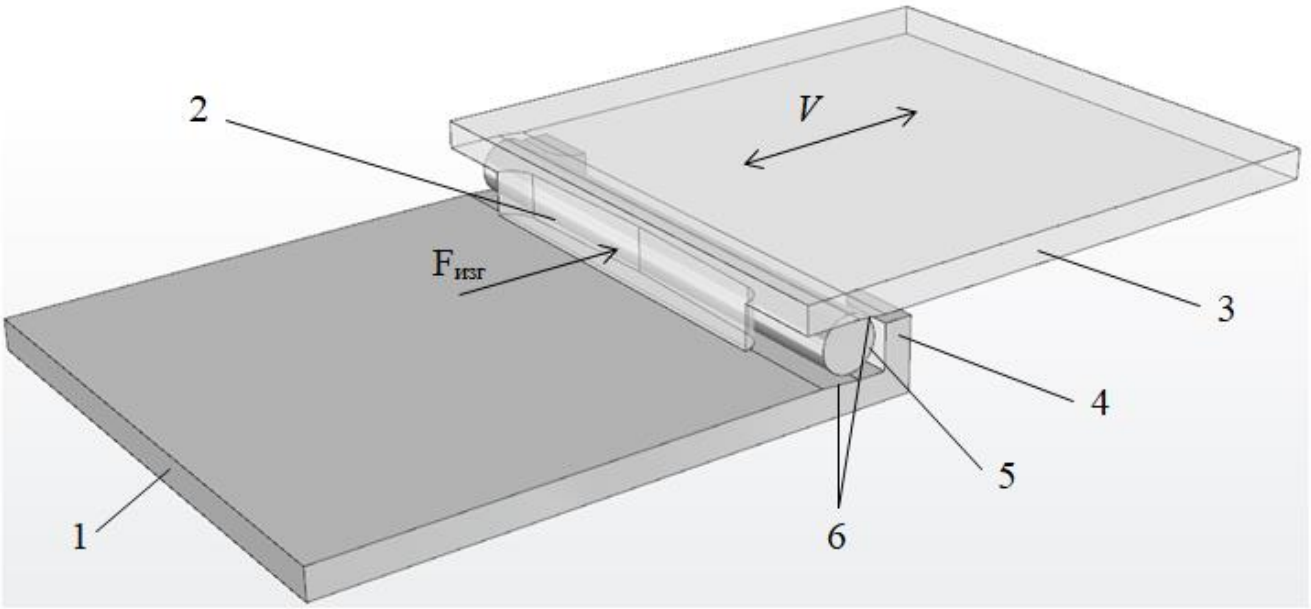
Геометрическая модель процесса правки нежестких цилиндрических деталей изгибом и поперечной обкаткой гладкими плитами [26, 27, 29, 30, 31, 33] представлена на рисунке 2.1, которая состоит из нижней жестко закрепленной плиты 1 и верхней плиты 3, перемещающейся в горизонтальном направлении, между плитами размещена заготовка 5. Нижняя плита имеет два упора 4, на которые опирается заготовка 5. Верхняя плита имеет центральный выступ 2, который используют для нагружения заготовки. Для выправления детали используются следующие этапы:

– Заготовку кладут на нижнюю плиту, вогнутость при этом направлена в направлении упоров 4.

– Верхняя плита опускается вниз до контакта с заготовкой 5, затем перемещается вправо на величину общего прогиба ($f_{\text{общ}}^{max}$). Таким образом, реализуется перегиб заготовки, необходимый для ее выправления.

– Далее верхняя плита перемещается влево, заготовка принимает прямолинейную форму, верхняя плита перемещается вниз для обеспечения необходимого обжатия.

– После этого верхняя плита перемещается влево, клиновой частью захватывает заготовку, которая поворачивается вокруг своей оси и получает пластическую деформацию по всей цилиндрической поверхности.



1 – неподвижная нижняя плита; 2 – выступ верхней плиты; 3 – подвижная верхняя плита; 4 – упоры нижней плиты; 5 – заготовка; 6 – клиновой участок плит

Рисунок 2.1 – Геометрическая модель процесса ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами

Сущность метода правки нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами заключается в создании напряжений в заготовке путем упругопластического изгиба в направлении, противоположном исходному прогибу (рис. 2.2) и изменении напряженного состояния в процессе поперечной обкатки гладкими плитами при постоянных параметрах режима пластического деформирования (относительная степень обжатия). Поперечная обкатка необходима для обеспечения стабильности прямолинейной формы заготовки и формирования равновесных остаточных напряжений по объему детали. При этом упрочнению подвергают поверхностный слой цилиндрической заготовки.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила установить, что 68 % валов из обрабатываемой партии деталей имеют изогнутую ось,

форма которой наиболее близко аппроксимируется уравнением параболы второй степени [19, 46, 56, 106]:

$$f_{\text{исх}}(z) = \frac{4f_{\text{исх}}^{max}}{L}\left(1 - \frac{z}{L}\right)z, \tag{2.1}$$

где $f_{\text{исх}}(z)$ – текущее значение исходного прогиба;

$f_{\text{исх}}^{max}$ – исходный прогиб в середине заготовки;

L – общая длина заготовки;

z – текущая координата по длине заготовки.

Определение максимального общего прогиба заготовки перед поперечной обкаткой гладкими плитами. Для принятой схемы (см. рис. 2.2) нагружения вала величины напряжения и прогиба вала определяются по уравнениям [45, 70, 71, 72].

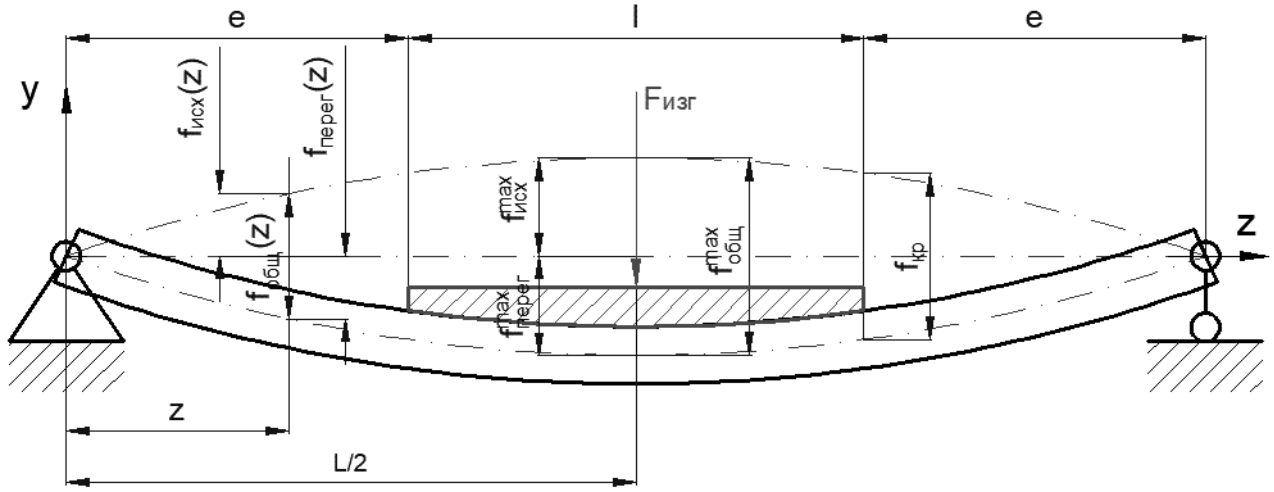


Рисунок 2.2 – Схема деформации заготовки при правке поперечным изгибом

Наибольшее напряжение изгиба (в середине вала)

$$\sigma_{max} = \frac{F_{\text{изг}}L}{8W}\left(2 - \frac{l}{L}\right). \tag{2.2}$$

Прогиб вала на расстоянии z от упора

$$f_{\text{общ}}(z) = \frac{F_{\text{изг}}L^3}{48EI}\left\{\left[3 - \left(\frac{l}{L}\right)^3\right]\frac{z}{L} - 4\left(\frac{z}{L}\right)^3 + 2\frac{L}{l}\left[\frac{z}{L} + \frac{1}{2}\left(\frac{l}{L} - 1\right)\right]^4\right\}. \tag{2.3}$$

Наибольший прогиб вала (в середине вала)

$$f_{\text{общ}}^{max} = f_{\text{общ}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{F_{\text{изг}}L^3}{48EI}\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{1}{8}\left(\frac{l}{L}\right)^3\right] = \frac{F_{\text{изг}}L^3A_1}{48EI} \qquad (2.4)$$

Прогиб вала на краю выступа верхней плиты

$$f_{\text{кр}} = \frac{F_{\text{изг}}L^3}{48EI}\left[1 - 2\left(\frac{l}{L}\right)^2 + \left(\frac{l}{L}\right)^3\right] = \frac{F_{\text{изг}}L^3A_2}{48EI}, \qquad (2.5)$$

где $F_{\text{изг}}$ – усилие изгиба вала от давления выступа верхней плиты;

W – осевой момент сопротивления поперечного сечения вала;

I – осевой момент инерции поперечного сечения вала;

l – длина выступа верхней плиты;

E – модуль упругости I рода материала;

$$A_1 = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{1}{8}\left(\frac{l}{L}\right)^3; \qquad A_2 = 1 - 2\left(\frac{l}{L}\right)^2 + \left(\frac{l}{L}\right)^3. \qquad (2.6)$$

Для упрощения расчетов прогиба по уравнениям (2.4) и (2.5) значения коэффициентов A_1 и A_2 представлены на графике (рис. 2.3).

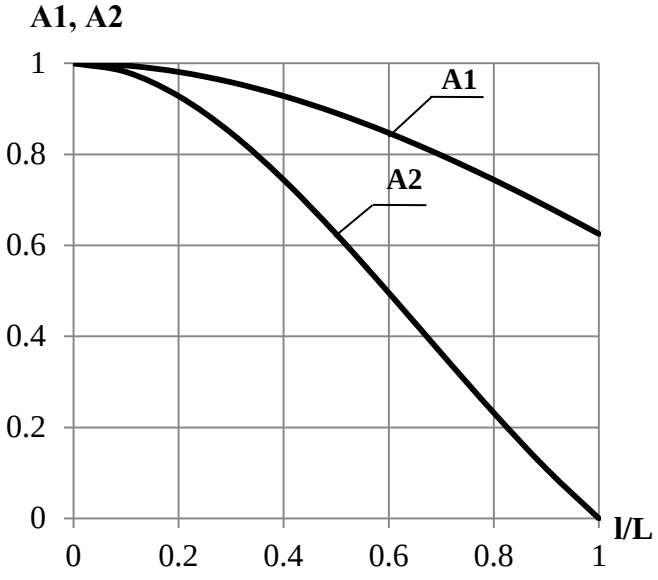


Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициентов A1, A2 от отношения *l/L*

При создании изгиба заготовки в направлении противоположном исходной остаточной деформации, максимальное напряжение изгиба не должно значитель-

но превышать предел текучести материала заготовки и не превышать предел прочности материала.

$$\sigma_{\text{т}} < \sigma_{max} < \sigma_{\text{в}}, \tag{2.7}$$

где $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести материала

Из равенств (2.2) и (2.7) получаем:

$$\sigma_{\text{т}} < \frac{F_{\text{изг}} L}{8W}\left(2 - \frac{l}{L}\right) < \sigma_{\text{в}}.$$

Отсюда:

$$F_{\text{изг}} < \frac{8W\sigma_{\text{в}}}{2L - l}. \tag{2.8}$$

Из уравнения (2.4) получен максимально допустимый общий прогиб вала при правке деталей поперечным изгибом.

$$\left[f_{\text{общ}}^{max}\right] = \frac{8W\sigma_{\text{в}}L^3 A_1}{48EI(2L - l)} = \frac{\sigma_{\text{в}}L^3 A_1}{6ER(2L - l)}, \tag{2.9}$$

где R – радиус заготовки.

Определение предельного исходного прогиба и величины перегиба при правке нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами. Технологические возможности предлагаемого способа правки ограничены тем обстоятельством, что при большой величине деформации от воздействия поперечной силы в крайних сечениях обрабатываемого вала может начаться пластическое течение поверхностного слоя материала.

Следовательно, было необходимо просчитать максимальную величину исходного прогиба заготовки, который можно устранить в процессе правки.

Предварительное упругое деформирование заготовки осуществляют путем приложения поперечной силы, позволяющей в каждом поперечном сечении обрабатываемого участка выполнить условие (см. рис. 2.2):

$$f_{\text{общ}}(z) = f_{\text{исх}}(z) + f_{\text{перег}}(z), \tag{2.10}$$

где $f_{общ}(z)$ – общая деформация заготовки перед поперечной обкаткой, отсчитываемая от линии центров в текущем поперечном сечении z;

$f_{перег}(z)$ – текущее значение перегиба, отсчитывается от линии центров.

$$f_{перег}(z) = \xi f_{исх}(z), \tag{2.11}$$

где ξ — коэффициент перегиба; $\xi = \frac{f_{общ}^{max} - f_{исх}^{max}}{f_{исх}^{max}}$.

При $z = e$, поставив в уравнение (2.1) имеем:

$$f_{исх}(\text{e}) = \frac{4f_{исх}^{max}}{L}\left(1 - \frac{e}{L}\right)e. \tag{2.12}$$

Поставив $z = e$ в уравнение (2.10) получаем:

$$f_{общ}(e) = f_{исх}(e) + f_{перег}(e)$$

$$\text{или} \qquad f_{кр} = f_{исх}(e) + f_{перег}(e), \tag{2.13}$$

$$\text{где} \quad e = (L - l)/2. \tag{2.14}$$

где e – расстояние от торца заготовки до края выступа верхней плиты.

Подставив (2.5), (2.11), (2.12) и (2.14) в (2.13) получено равенство:

$$f_{исх}^{max} = \frac{F_{изг}L^5A_2}{48EI(\xi + 1)(L^2 - l^2)}. \tag{2.15}$$

Подставив (2.8) в (2.14), можно рассчитать величину предельно допустимой исходной деформации (прогиба), которую можно устранить данным способом правки.

$$[f_{исх}^{max}] = \frac{\sigma_в L^5 A_2}{6ER(\xi + 1)(L^2 - l^2)(2L - l)}$$

или

$$[f_{исх}^{max}] = \frac{\sigma_в L^2 A_2}{3ED(\xi + 1)\left(1 - \frac{l^2}{L^2}\right)\left(2 - \frac{l}{L}\right)}. \tag{2.16}$$

где D – диаметр заготовки.

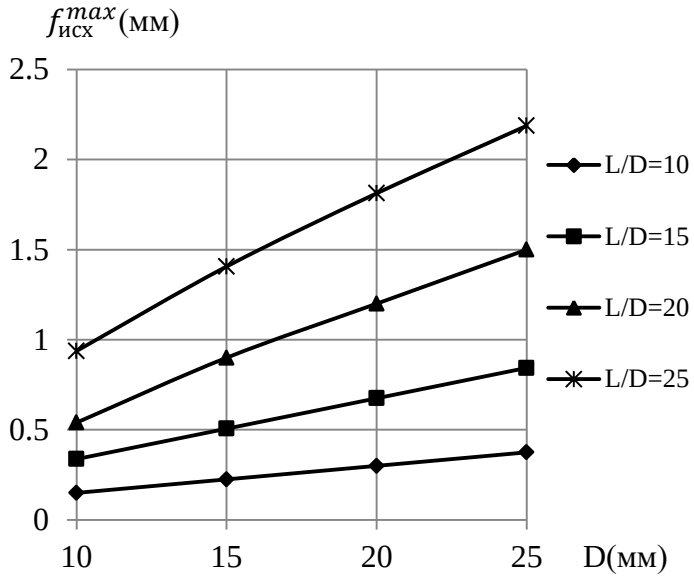


Рисунок 2.4 – Зависимость придельного исходного прогиба заготовки от величины диаметра и жесткости заготовки при правке гладкими плитами

По формуле (2.16) построены кривые (рис. 2.4) зависимости придельного исходного прогиба от диаметра D и жесткости (отношения L/D) заготовки (при l/L=0,5, $\xi = 4$ и предел прочности для Ст45 – $\sigma_в = 600$ МПа).

2.2 Обоснование вида нагружения и режимов при поперечной правке цилиндрических деталей

Определение остаточного напряженного состояния искривленных деталей. Исходная геометрия заготовки – кривой вал. Данная форма может быть следствием предварительной деформации и соответствовать заготовке без остаточных напряжений (после термообработки), или заготовке с остаточными напряжениями. В первом случае на процесс правки нужно наложить такое поле остаточных напряжений, которое бы выправило вал. Во втором случае, если кривизна есть результат остаточных напряжений, будем считать, что правка ликвидирует исходные остаточные напряжения и вал выправится. В соответствии с теоремой о разгрузке [5] остаточные напряжения равны разности между истин-

ными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые бы создавались в нем при предположении об идеальной упругости материала. Поскольку точное решение задачи для линейно упрочняющегося тела крайне сложно, то решить ее можно приближенно, на основании геометрических соображений.

Предположим, что в результате определенного воздействия гладкий вал деформируется таким образом, что его геометрическая ось принимает форму дуги окружности. Тогда его напряженное состояние можно приближенно изобразить эпюрами [5, 44] (рис. 2.5).

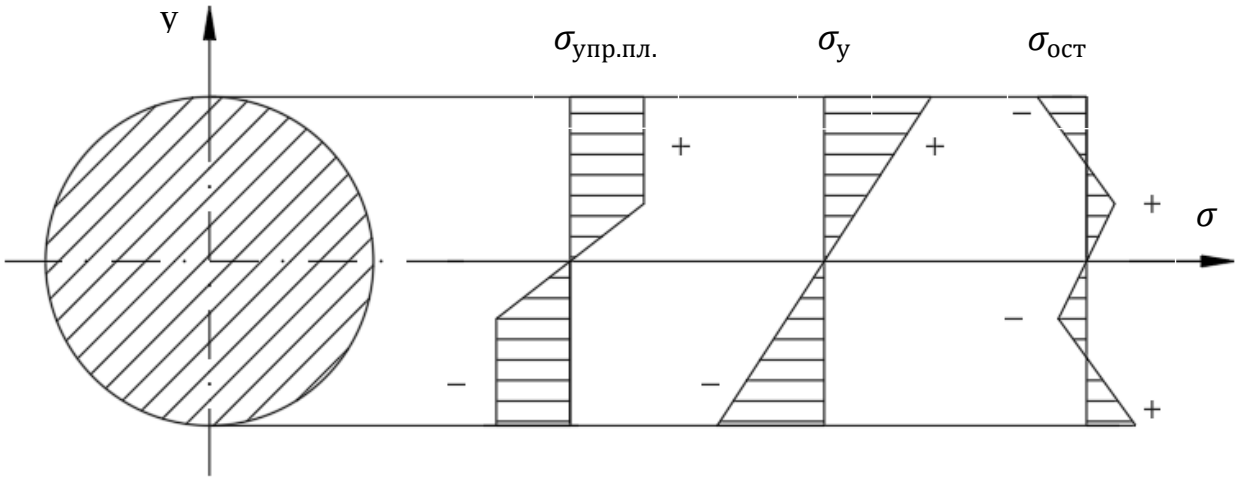


Рисунок 2.5 – Напряженное состояние заготовки при изгибе [5]

Следуя И. А. Биргеру [5], остаточное напряжение $\sigma_{ост}$ можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{упр.пл.} - \sigma_{у},$$

где $\sigma_{у}$ – упругое напряжение, $\sigma_{упр.пл.}$ – упругопластическое напряжение.

Эти напряжения должны создавать момент, ликвидирующий начальную кривизну. Оценим связь между величиной прогиба $f_{исх}$, характеризующую отклонение вала от прямолинейной оси и величиной остаточного напряжения $\sigma_{ост}$.

Из рис. 2.6 следует, что: EF = L – длина заготовки; OF = ρ – приведенный радиус кривизны; D – диаметр заготовки; Δl = 2(AB – EF) – удлинение заготовки; $f_{исх}$ – величина исходного прогиба; α – угол дуги кривизны вала.

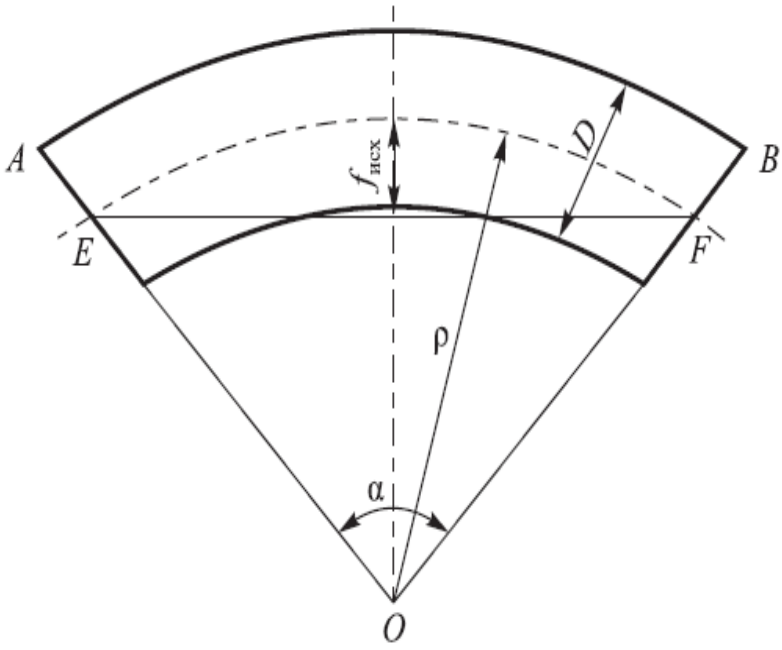


Рисунок 2.6 – Геометрия изогнутой заготовки

Исходный прогиб вала:

$$f_{\text{исх}} = \rho - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}. \tag{2.17}$$

Согласно [5], имеем удлинение заготовки:

$$\Delta l = \frac{L\sigma_{\text{ост}}}{E}, \tag{2.18}$$

где E – модуль упругости I рода материала;

Из рисунка 2.6, имеем:

$$\rho = OB - \frac{D}{2}; \quad sin\frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta l}{2D}; \quad OB = \frac{AB}{2sin\frac{\alpha}{2}}; \; AB = L + \frac{\Delta l}{2}. \tag{2.19}$$

Из 4-х равенств (2.19) получаем:

$$\rho = \frac{DL}{\Delta l}. \tag{2.20}$$

Подставляя равенство (2.20) в выражение (2.17), имеем:

$$f_{\text{исх}} = \frac{DL}{\Delta l} - \sqrt{\left(\frac{DL}{\Delta l}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} = \frac{DL}{\Delta l} - \frac{DL}{\Delta l}\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta l}{2D}\right)^2}.$$

Величина $\frac{\Delta l}{2D}$ всегда значительно меньше единицы. Воспользовавшись биномиальным разложением в ряд и отбросив все члены ряда, начиная с третьего получим:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta l}{2D}\right)^2} = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta l}{2D}\right)^2 + \frac{1}{2 \cdot 4}\left(\frac{\Delta l}{2D}\right)^4 - \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6}\left(\frac{\Delta l}{2D}\right)^6 + \cdots \approx 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta l}{2D}\right)^2.$$

Таким образом, приходим к следующему приближенному уравнению:

$$f_{\text{исх}} = \frac{DL}{\Delta l} - \frac{DL}{\Delta l}\left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta l}{2D}\right)^2\right) = \frac{L\Delta l}{8D}. \quad (2.21)$$

Подставляя равенство (2.18) в выражение (2.21), получаем:

$$f_{\text{исх}} = \frac{L^2 \sigma_{\text{ост}}}{8ED}. \quad (2.22)$$

Таким образом, чтобы ликвидировать начальный прогиб вала величиной $f_{исх}$, необходимо создать эквивалентные остаточные напряжения величиной:

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{8ED f_{\text{исх}}}{L^2}. \quad (2.23)$$

Из формулы (2.23) можно рассчитать максимальное остаточное напряжение по текущей длине заготовки:

$$\sigma_{\text{ост}}^{max}(z) = \frac{8ED \cdot f_{\text{исх}}(z)}{L^2}. \quad (2.24)$$

где $f_{\text{исх}}(z)$ – текущее значение исходного прогиба, считающее по формулам (2.1).

Определение характера распределения остаточных напряжений после правки изгибом. Для аналитических расчетов остаточных напряжений по сечению после правки изгибом, выполнены некоторые опыты по правке валов из стали 45. Параметры валов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные параметров валов

Вал	Диаметр D (мм)	Длина L (мм)	Исходный прогиб $f_{исх}$ (мм)
1	10	200	0,5
2	15	225	0,5
3	15	300	0,9
4	20	400	1,2

После правки изгибом получены только осевые остаточные напряжений $\sigma_Z^{ост}$ (рис. 2.7).

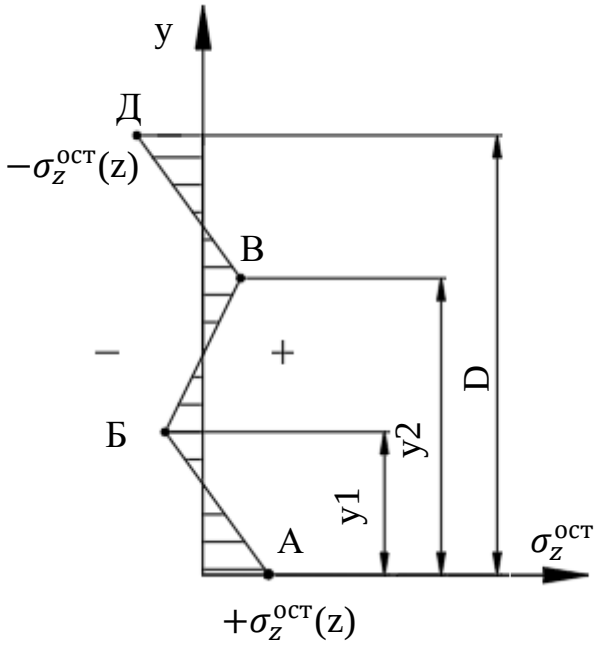


Рисунок 2.7 – Эпюра остаточных напряжений вала после правки изгибом

Остаточные напряжения в цилиндрических деталях исследовали методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS [2, 98], предназначенной для математического моделирования различных физических процессов. Моделирование процесса правки в программе ANSYS позволяет определить напряженно-деформированное состояние заготовки, что необходимо при разработке оптимального технологического процесса.

С помощью компьютерной программы выполнены некоторых опыты моделирования процесса поперечной правки цилиндра изгибом. Получены результаты

остаточных напряжений в точках А, Б, В, Д и значения величин *y1* и *y2* в середине вала приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты моделирования процесса правки

Вал	Остаточные напряжения (МПа)				*y1* (мм)	*y2* (мм)
	Точка А	Точка Б	Точка В	Точка Д		
1	202	-166	166	-198	3,54	6,45
2	217	-164	163	-213	5,31	9,68
3	219	-176	176	-215	5,31	9,68
4	226	-176	177	-224	7,08	12,9

Из таблицы 2.2 получены абсолютное значение остаточного напряжения в точке Б, В равно примерно 0,8 от величин в точке А, Д. Значение *y1* равно примерно 0,35 от диаметра вала и y2 равно 0,65 от диаметра вала. Тогда, имеем координаты точек А, Б, В, Д для всех случаев:

$$\text{А}(0;\ \sigma_{\text{ост}}^{max}(z)); \quad \text{Б}(0{,}35\text{D};\ -0{,}8\sigma_{\text{ост}}^{max}(z));$$

$$\text{В}(0{,}65\text{D};\ -0{,}8\sigma_{\text{ост}}^{max}(z)); \quad \text{Д}(\text{D};\ -\sigma_{\text{ост}}^{max}(z)).$$

Из 4-х точек А, Б, В, Д установим уравнение кривой АБВД (рис. 2.7) для аналитических расчетов осевых остаточных напряжений по текущему значению параметра y:

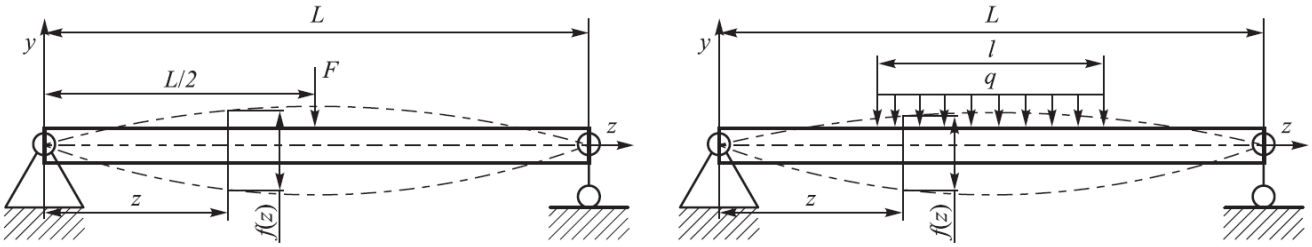
$$\sigma_z^{\text{ост}}(y) = \begin{cases} \sigma_{\text{ост}}^{max}(z) \cdot \left(1 - \dfrac{1{,}8y}{0{,}35D}\right) & \text{при } 0 \le y \le 0{,}35D \\ \sigma_{\text{ост}}^{max}(z) \cdot \left(\dfrac{1{,}6y - 0{,}8D}{0{,}3D}\right) & \text{при } 0{,}35D \le y \le 0{,}65D \\ \sigma_{\text{ост}}^{max}(z) \cdot \left(\dfrac{-1{,}8y + 1{,}45D}{0{,}35D}\right) & \text{при } 0{,}65D \le y \le D \end{cases} \qquad (2.25)$$

Таким образом, после процесса правки изгибом получен тензор напряжений следующего вида:

$$\text{Т}_{\text{изг}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^{\text{ост}}(y) \end{bmatrix}, \qquad (2.26)$$

где $\sigma_z^{\text{ост}}(y)$ рассчитаем по формулам (2.25).

Определение напряженного состояния в результате обратного изгиба. Чтобы выправить вал поперечной нагрузкой, необходимо создать некоторый перегиб (обратный прогиб), который в результате разгрузки обеспечивает прямолинейность оси. Рассмотрим напряженное состояние вала при разных схемах нагружения.



а) б)

Рисунок 2.8 – Схемы нагружения вала: а) – при действии сосредоточенной поперечной силы; б) – при воздействии распределённой нагрузки.

Для принятых схем (см. рис. 2.8) нагружения вала, величины напряжения и прогиба вала определяются по уравнениям [15, 68, 75, 115].

Для схемы рис. 2.8 а), максимальный прогиб вала (в середине вала):

$$f_{max} = \frac{FL^3}{48EI_x}. \tag{2.27}$$

Максимальное нормальное напряжение в объеме вала при действии силы (в середине вала):

$$\sigma_{max}^{F} = \frac{FLR}{4I_x}. \tag{2.28}$$

Для выправления вала необходимо чтобы $\sigma_т \leq \sigma_{max}^{F} < \sigma_в$, тогда:

$$\frac{4I_x\sigma_т}{LR} \leq F < \frac{4I_x\sigma_в}{LR}, \tag{2.29}$$

где $\sigma_т$ – предел текучести материала, $\sigma_в$ – предел прочности материала.

Для схемы рис. 2.8 б), наибольший прогиб вала (в середине вала)

$$f_{max} = \frac{qlL^3}{48EI_x}\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{1}{8}\left(\frac{l}{L}\right)^3\right]. \tag{2.30}$$

Максимальное напряжение изгиба при воздействии распределённой нагрузки (в середине вала):

$$\sigma_{max}^{q} = \frac{qlLR}{8I_x}\left(2 - \frac{l}{L}\right) = \frac{FLR}{8I_x}\left(2 - \frac{l}{L}\right). \quad (2.31)$$

Для выправления вала необходимо чтобы $\sigma_т \leq \sigma_{max}^{q} < \sigma_в$, тогда:

$$\frac{8I_x\sigma_т}{LR\left(2 - \frac{l}{L}\right)} \leq F < \frac{8I_x\sigma_в}{LR\left(2 - \frac{l}{L}\right)}. \quad (2.32)$$

Оценим напряженное состояние заготовки, возникающее при действии поперечной сосредоточенной силы и распределенной нагрузки.

Результаты расчета напряженного состояния при поперечной правке цилиндрических деталей. Для принятой модели поперечной правки, конечные элементы находятся в условиях объемного напряженного состояния, поэтому интенсивность напряжений представлена для объемных элементов формулой Губера-Мизеса [37, 40, 50]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_\rho - \sigma_\theta\right)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_\rho\right)^2}, \quad (2.33)$$

где σ_ρ, σ_θ, σ_z – радиальное; тангенциальное; осевое напряжение.

Напряженно-деформированное состояние цилиндрического тела рассмотрено с помощью прикладной программы ANSYS Workbench [98], которая предназначена для математического моделирования различных физических процессов, используя метод конечных элементов.

Для выбора оптимальной схемы нагружения и оценки влияния схемы нагружения на напряженно-деформированное состояние приведено моделирование на цилиндрах одинаковых диаметров D и длиной L с использованием программы ANSYS workbench. Приняты следующие параметры моделирования: нежесткие цилиндрические детали из стали Ст45 диаметром 10 мм, длиной 200 мм, модуль Юнга $E = 2 * 10^5$ МПа, предел текучести $\sigma_т = 360$ МПа, предел прочности $\sigma_в = 600$ МПа, максимальный исходной прогиб $f_{исх}$ = 0,5 мм [31, 33].

Из условия (2.29) с заданными параметрами вала получены предельные значения силы изгиба для выправления этого вала:

$$700 \leq F < 1200 \text{ Н}. \quad (2.34)$$

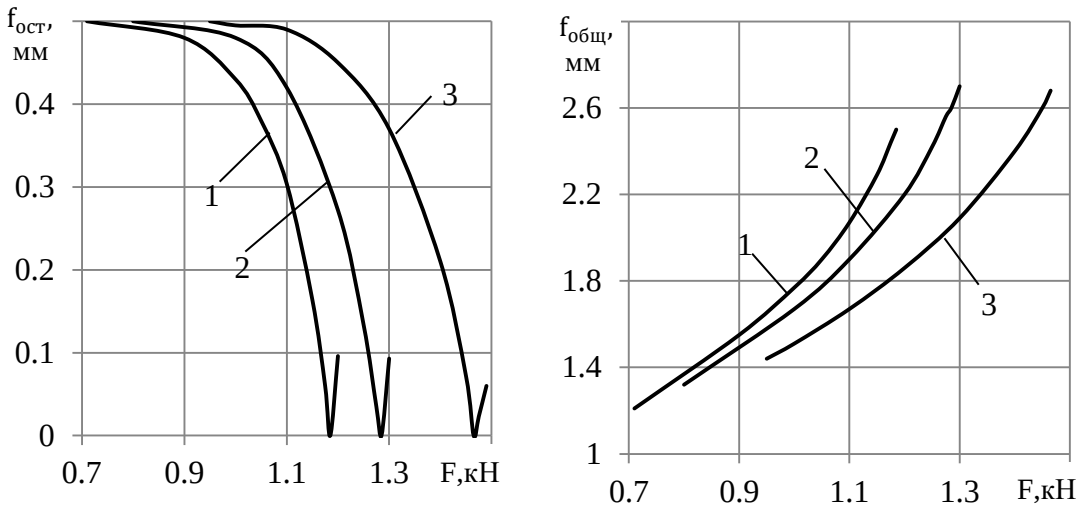
Из условия (2.32) с заданными параметрами вала получены предельные значения силы изгиба для выправления этого вала:

$$800 \leq F < 1300 \text{ Н, при } \frac{l}{L} = 0{,}25 \tag{2.35}$$

$$950 \leq F < 1490 \text{ Н, при } \frac{l}{L} = 0{,}5, \tag{2.36}$$

где $F = q.l$, q – распределенная нагрузка (Н/м) , l – длина участка, на котором приложена распределенная нагрузка (м).

С помощью прикладной компьютерной программы ANSYS Workbench выполнено моделирование процесса правки цилиндрических деталей с учетом условий (2.34), (2.35), (2.36). Получены кривые зависимости величины остаточных прогибов после поперечной правки и кривые зависимости величины обратных прогибов при поперечном изгибе от величины силы изгиба (рис. 2.9).



а) *б)*

Рисунок 2.9 – Зависимость остаточных прогибов после поперечной правки (а) и зависимость обратных прогибов при поперечном изгибе (б) от силы изгиба: 1 – изгиб при действии сосредоточенной поперечной силы; 2 – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (l/L = 0,25); 3 – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (l/L = 0,5)

По кривым рис. 2.9 построены кривые зависимости величины остаточных прогибов после поперечной правки от величины обратных прогибов при поперечном изгибе (рис. 2.10).

Результаты расчетов, представление на рис. 2.10 показывают что, для выправления вала диаметром 10 мм, длиной 200 мм с исходным прогибом 0,5 мм с помощью воздействия распределённой нагрузки (l/L = 0,5) нужно нагрузить вал до величины общего прогиба 2,68 мм. Если прогиб будет меньше этой величины, то остаточный прогиб будет больше нуля, т.е. вал не выправится. Если прогиб будет больше 2,68 мм, то мы получим искривление вала в противоположном (от исходного) направлении [31].

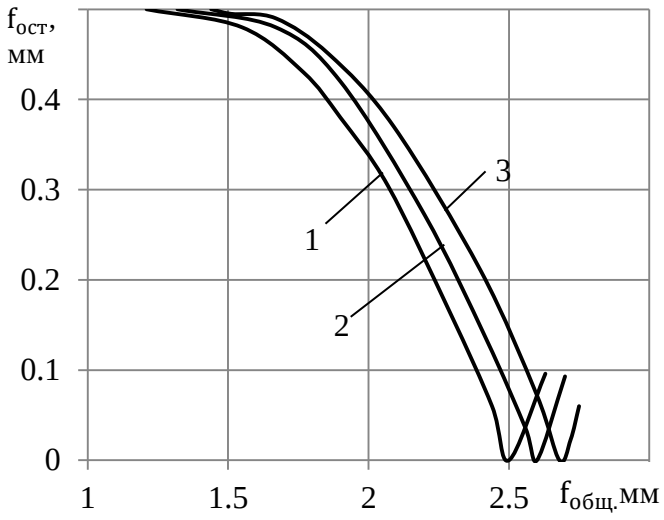


Рисунок 2.10 – Зависимость остаточных прогибов после правки от величины обратных прогибов (при D = 10 мм, L = 200мм, $f_{исх}$ = 0,5 мм): 1 – изгиб при действии поперечной силы; 2 – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (*l/L* = 0,25); 3 – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (*l/L* = 0,5)

По формулам (2.28), (2.29), (2.31), (2.32) выполнены расчеты в компьютерной программе и получены кривые зависимости остаточных прогибов от величины напряжений изгиба (рис. 2.11). На рис. 2.11 показано, что для выправления вала диаметром 10 мм, длиной 200 мм с исходным прогибом 0,5 мм нужно создать напряжение изгиба равное, примерно, 370 МПа. При напряжении меньше этого

значения вал будет иметь остаточный прогиб, а если напряжение превысит 370 МПа, то вал изогнется в противоположном направлении.

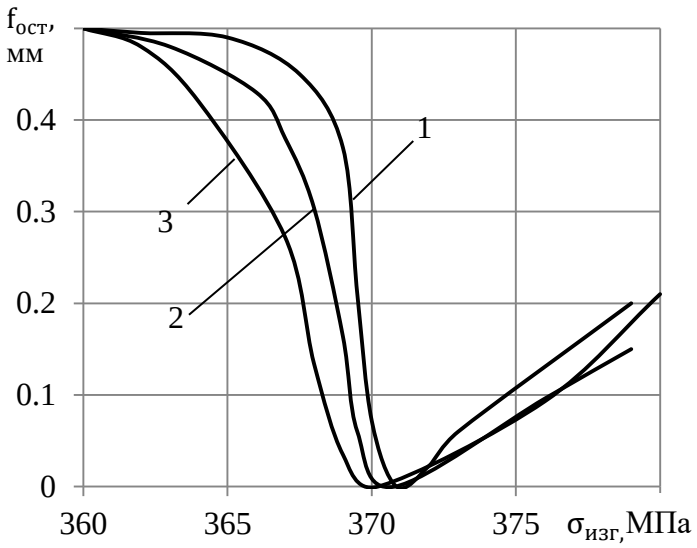


Рисунок 2.11 – Зависимость остаточных прогибов от величины интенсивности напряжений при изгибе (при D = 10 мм, L = 200мм, $f_{исх}$ = 0,5 мм): 1 – изгиб при действии поперечной силы; 2 – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (*l*/*L* = 0,25); 3 – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (*l*/*L* = 0,5)

С помощью компьютерной программы выполнены некоторых опыты моделирования процесса поперечной правки цилиндра с учетом условия (2.32), построены кривые зависимости максимальных интенсивности остаточных напряжений после поперечной правки от величины отношения *l*/*L* (рис. 2.12).

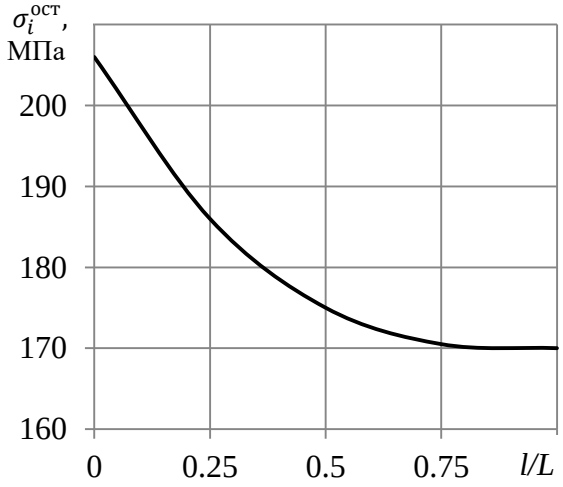


Рисунок 2.12 – Зависимость максимальной интенсивности остаточных напряжений после поперечной правки изгибом от величины отношения *l*/*L*

На рис. 2.12 показано что, при увеличении отношения l/L , величина остаточных напряжений уменьшается. При l/L = 0 – это способ нагружения при воздействии распределённой нагрузки преобразуется в способ нагружения действием поперечной силы (по формулам (2.27), (2.28), (2.30), (2.31)). Поэтому более эффективным способом нагружения является способ при воздействии распределённой нагрузки. Таким образом, для снижения величина остаточных напряжений в цилиндрических заготовках длина нагружающего участка с распределенной нагрузкой должна составлять (0,7 – 0,8) от длины заготовки (см. рис. 2.12).

На рис. 2.13 представлены некоторые результаты расчетов остаточных напряжений в объеме заготовки при правке поперечным изгибом. Здесь ось Y совпадает с плоскостью действия силовой нагрузки.

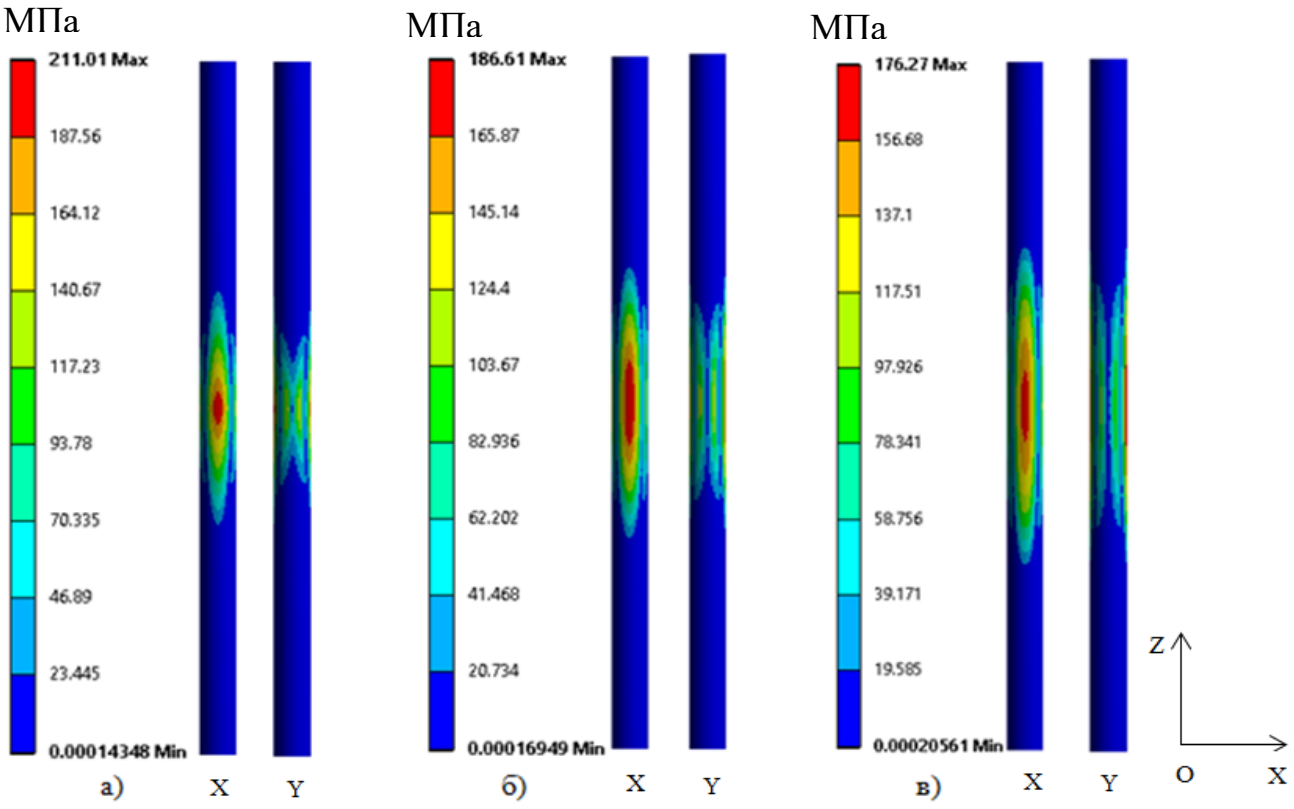
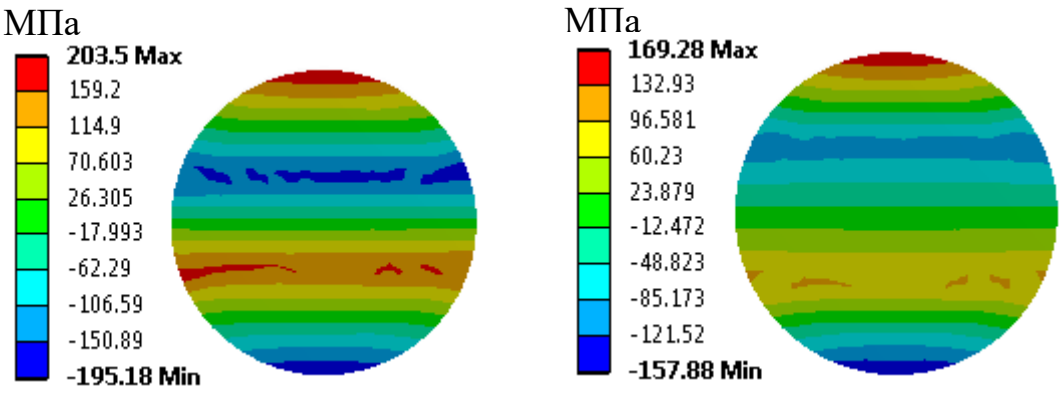


Рисунок 2.13 – Интенсивность остаточных напряжений после правки поперечной изгибом: а) – изгиб при действии поперечной силы;
б) – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (l/L = 0,25);
в) – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (l/L = 0,5)



а) б)

Рисунок 2.14 – Распределение остаточных напряжений по сечению (в середине заготовки) после правки поперечной изгибом: а) – изгиб при действии поперечной силы; б) – изгиб при воздействии распределённой нагрузки (*l*/*L* = 0,5)

Из рис. 2.13 и рис. 2.14 видно, что после правки поперечным изгибом формируются неравновесные напряжения по всему объему заготовки и с течением времени форма детали может снова исказиться. Поэтому после выполнения процесса правки изгибом, необходимо дополнительно упрочнять заготовки способом поверхностного пластического деформирования, основанным на поперечной обкатке заготовки гладкими плитами.

Для оценки влияния величины обратных прогибов на изменение величины исходного прогиба вала проведены машинные опыты с цилиндрами диаметрами *D*=10; 15; 20; 25 мм и соответствующей длиной *L*=10*D;* 15*D;* 20*D;* 25*D* мм. Приняты следующие параметры моделирования: нежесткие цилиндрические детали из стали Ст45, модуль Юнга $E = 2 * 10^5$ МПа, предел текучести $\sigma_т = 360$ МПа, предел прочности $\sigma_в = 600$ МПа. Правка выполнена поперечным изгибом при воздействии распределённой нагрузки на цилиндрические образцы с величиной отношения *l*/*L* = *0,7*. Если максимальная величина исходного прогиба вала будет превышать значение, представленное на рис. 2.4, то для выправления детали потребуется величина обратного прогиба, при котором напряжения будут превы-

шать предел текучести или предел прочности материала. Таким образом, при значительном искривлении вала правка обратным изгибом может привести либо к большим локальным деформациям, либо к разрушению валов [31].

Результаты машинных экспериментов представлены в таблице 2.3. Зная диаметр (*D*), жесткость (*L/D*) и величину исходного прогиба ($f_{\text{исх}}$), можно определить величину общего прогиба, который обеспечивает полное выправление заготовки.

Таблица 2.3 – Результаты влияния величины общего прогиба на изменение исходного прогиба вала

L/D	*D*(мм)							
	10		15		20		25	
	$f_{\text{исх}}$ (мм)	$f_{\text{общ}}$ (мм)	$f_{\text{исх}}$ (мм)	$f_{\text{общ}}$ (мм)	$f_{\text{исх}}$ (мм)	$f_{\text{общ}}$ (мм)	$f_{\text{исх}}$ (мм)	$f_{\text{общ}}$ (мм)
10	0,150	0,810	0,225	1,230	0,300	1,610	0,375	2,010
15	0,375	2,000	0,500	2,680	0,675	3,610	0,840	4,510
20	0,540	2,970	0,900	4,790	1,200	6,380	1,500	7,980
25	0,937	4,970	1,400	7,450	1,800	9,790	2,180	11,950

Зависимость между исходным ($f_{\text{исх}}$) и общим ($f_{\text{общ}}$) прогибом можно представить в виде:

$$f_{\text{общ}} = \xi \cdot f_{\text{исх}}. \tag{2.37}$$

где ξ – коэффициент изгиба.

По данным таблицы 2.3 и по формуле (2.37) построены графики зависимости коэффициента изгиба от величины диаметра и жесткости заготовки при поперечной правке (рис. 2.15).

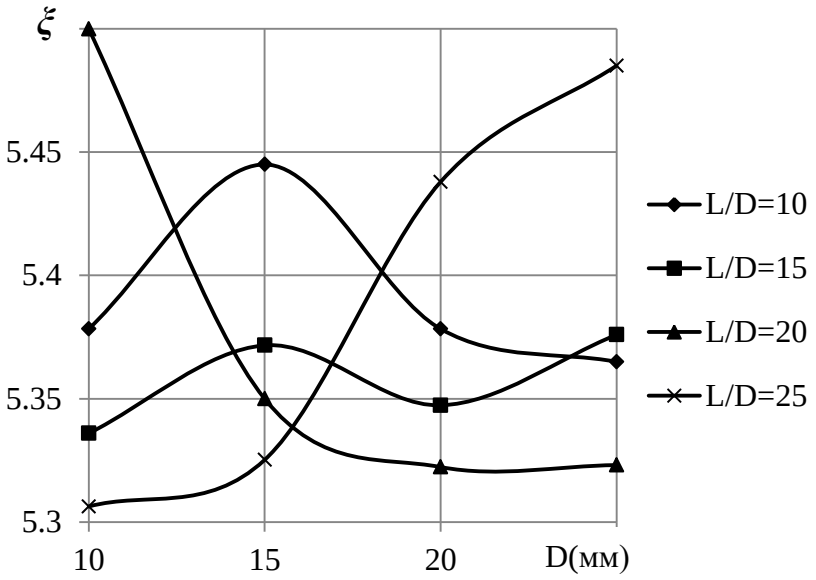


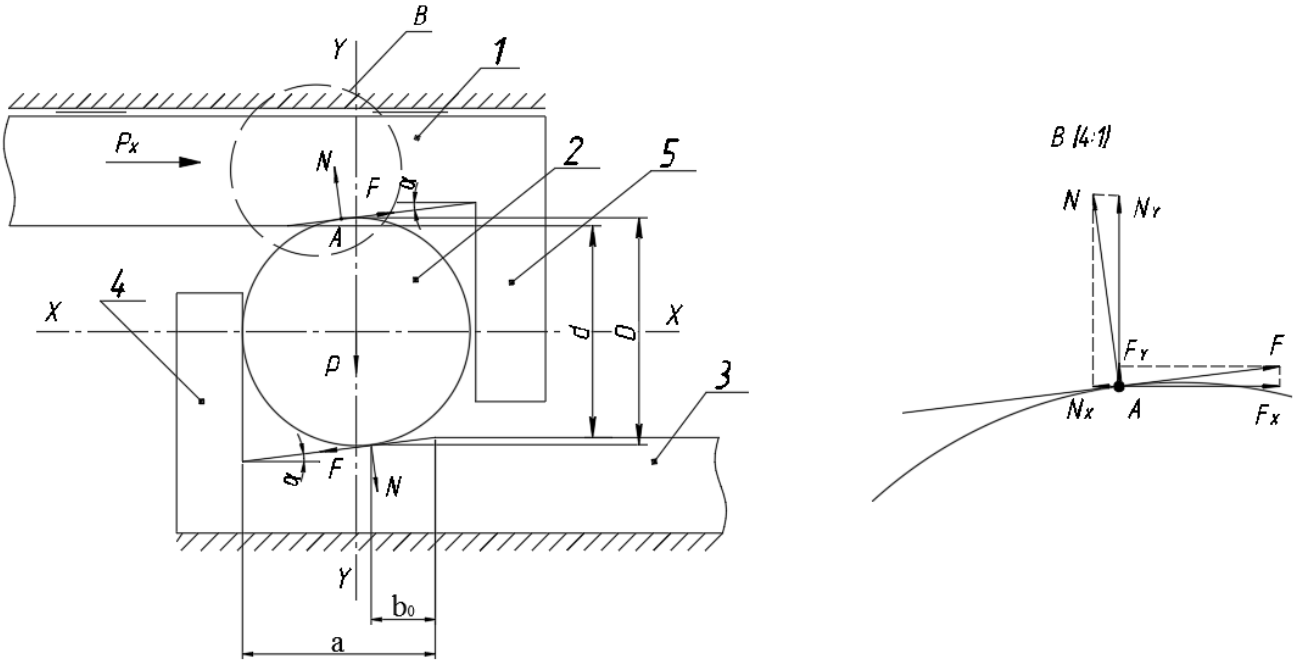
Рисунок 2.15 – Зависимость коэффициента изгиба от величины диаметра и жесткости заготовки при поперечной правке

Для условий данного эксперимента получены предельные значения коэффициентов изгиба от 5,3 до 5,5 для всех случаев жесткости вала при правке поперечным изгибом распределенной нагрузкой с отношением *l/L* равным 0,7.

2.3 Определение условия захвата заготовки гладкими плитами

Для осуществления процесса обкатки заготовки гладкими плитами необходимо создать определённые условия. При этом следует отдельно рассматривать условия при неустановившемся процессе обкатки – для начального момента, когда заготовка только подводится к плитам (рис. 2.16) и при установившемся процессе, когда заготовка уже втянута в плиты (рис. 2.17).

Рассмотрим схему захвата заготовки гладкими плитами (см. рис. 2.16). В заходной части главным геометрическим параметром является угол подъема α. При неустановившемся процессе обкатки в момент соприкосновения заготовки с плитами последние будут оказывать на неё действие в виде сил *N*, направленных нормально к поверхности валов в точках соприкосновения заготовки с плитами *A*, и сил трения *F*, направленных по касательной, как показано на рис. 2.16.



1 – подвижная плита, 2 – заготовка, 3 – неподвижная плита, 4 – упоры, 5 – выступ

Рисунок 2.16 – Схема захвата заготовки гладкими плитами

Для выявления действия указанных сил N и F на условия захвата заготовки плитами спроектируем их на горизонтальную ось XX (по направлению обкатки) и на вертикальную YY.

По направлению обкатки (ось XX), для осуществления процесса обкатки, горизонтальная сила F_X должно быть больше силы N_X, тогда имеем:

$$F \cdot cos\alpha > N \cdot sin\alpha$$

$$\mu \cdot N \cdot cos\alpha > N \cdot sin\alpha$$

$$tg\alpha < \mu$$

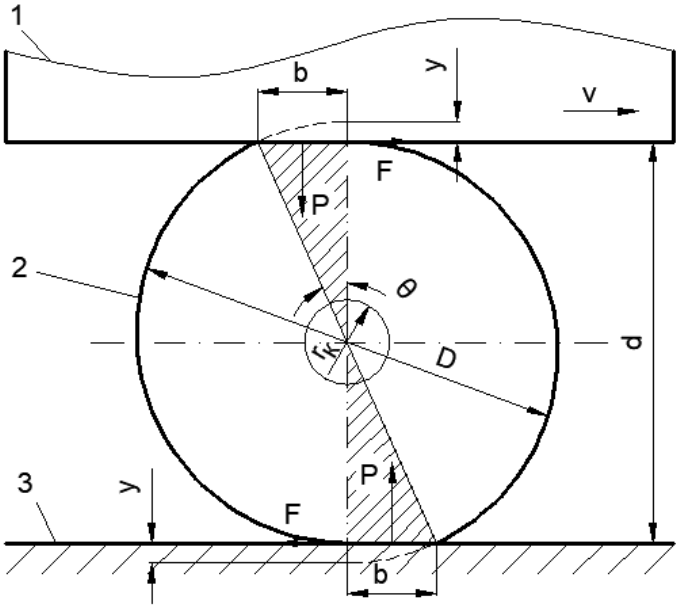
$$\alpha < arctg(\mu), \qquad (2.38)$$

где μ – коэффициент трения между заготовкой и плитами.

Значение коэффициента трения для пары сталь-сталь при холодной обкатке находится в пределах от 0,03 до 0,15 [37, 51, 81, 102]. По формулам (2.38) получаем значение угла α, которое находится в диапазоне 2° до 8°.

Расстояние (b_0) от точки касания заготовки с плитой в начальном моменте до рабочей части плиты рассчитается по формуле $b_0 = \frac{D-d}{2tg\alpha}$. Расстояние (а) от упоров нижней плиты до рабочей части плиты должно быть $a > \frac{D}{2} + \frac{D-d}{2tg\alpha}$.

Определение предельного обжатия при поперечной обкатке гладкими плитами. Рассмотрим схему поперечной обкатки гладкими плитами при установившемся процессе, когда заготовка уже втянута в пространство между плитами [21]. Как видно из рисунка 2.17, направление движения верхней плиты перпендикулярно оси вращения обкатываемого цилиндрического тела. Расстояние между плитами меньше исходного диаметра цилиндра на величину $2y$ – это величина абсолютного обжатия. К заготовке в направлении центральной оси приложены усилия P, направленные нормально к контактной площадке. При поперечной обкатке возникают сил трения F на площадки контакта заготовки с плитами, приложенных со стороны плит к заготовке, образуя вращающий момент, приводящий к вращению заготовки.



1 – подвижная плита,

2 – заготовка,

3 – неподвижная плита,

$r_к$ – радиус упругого ядра

Рисунок 2.17 – Схема усилий при поперечной обкатке гладкими плитами

Согласно [81] ширина контактной площадки между заготовкой и плитами b при поперечной обкатке:

$$b = \sqrt{yd + 2y^2}. \qquad (2.39)$$

И предельная ширина площадки контакта заготовки и плит:

$$b = \mu \cdot d, \tag{2.40}$$

где μ – коэффициент трения.

Возведём квадрат обе стороны равенства (2.39), получаем:

$$b^2 = yd + 2y^2$$

$$\Leftrightarrow y^2 + \frac{d}{2}y - \frac{b^2}{2} = 0.$$

Решая это уравнение, получаем:

$$y_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \frac{d}{4}\sqrt{1 + 8\left(\frac{b}{d}\right)^2}$$

Так как значение y>0, поэтому:

$$\text{y} = -\frac{d}{4} + \frac{d}{4}\sqrt{1 + 8\left(\frac{b}{d}\right)^2}. \tag{2.41}$$

Величина $\frac{b}{d} \ll 1$, преобразуем равенство (2.41), используя биномиальное разложение в ряд, получаем:

$$\sqrt{1 + 8\left(\frac{b}{d}\right)^2} = 1 + \frac{1}{2} \cdot 8\left(\frac{b}{d}\right)^2 - \frac{1}{2 \cdot 4}8^2\left(\frac{b}{d}\right)^4 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6}8^3\left(\frac{b}{d}\right)^6 - \cdots \approx 1 + 4\left(\frac{b}{d}\right)^2$$

Тогда равенство (2.41) приводит к следующему уравнению:

$$\text{y} = -\frac{d}{4} + \frac{d}{4}\left(1 + 4\left(\frac{b}{d}\right)^2\right).$$

$$\Leftrightarrow y = \frac{b^2}{d}. \tag{2.42}$$

Подставляя равенство (2.40) в выражение (2.42), имеем:

$$\text{y} = \frac{\mu^2 d^2}{d} = \mu^2 d. \tag{2.43}$$

Величина относительного обжатия при правке поперечной обкаткой гладкими плитами определяется по формуле:

$$Q = \frac{D - d}{D} \cdot 100\%.$$

Исходный диаметр заготовки D можно определить через конечный диаметр d:

$$D = d + 2y = d + 2\mu^2 d = (1 + 2\mu^2)d.$$

Тогда получим максимальное значение абсолютного обжатия:

$$\Delta H = D - d = 2y = \frac{2\mu^2 D}{2\mu^2 + 1}. \quad (2.44)$$

и предельное значение Q:

$$Q = \frac{2\mu^2}{2\mu^2 + 1} \cdot 100\%. \quad (2.45)$$

Из выражения (2.45) можно определить максимальную величину относительного обжатия заготовки (Q), которое зависит от коэффициента трения (μ) при поперечной обкатке. В литературе [37, 51, 81, 102] даны значения коэффициента трения (μ) при холодной поперечной обкатке для пары сталь-сталь, которые находится в пределах от 0,03 до 0,15. По формулам (2.45) построен график зависимости предельного относительного обжатия Q от коэффициента трения μ (рис. 2.18).

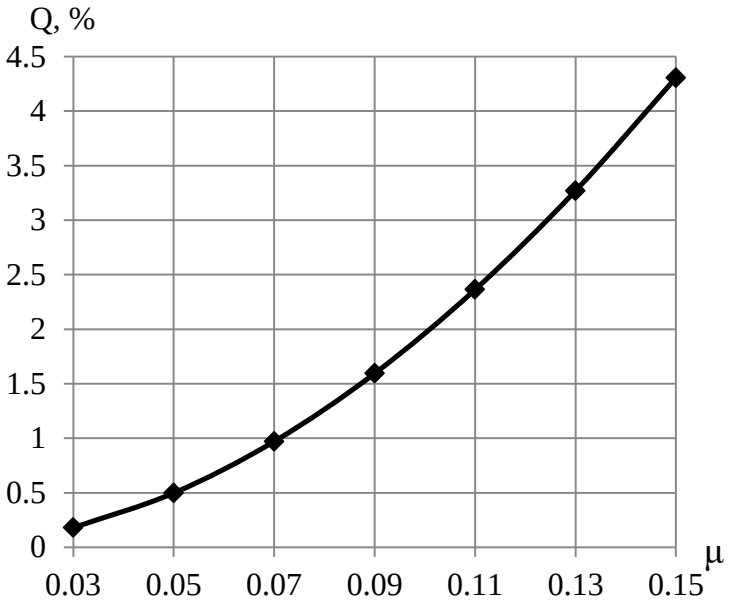


Рисунок 2.18 – Зависимость предельного относительного обжатия от коэффициента трения

Таким образом, в результате аналитических расчетов установлены основные параметры процесса правки цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами.

2.4 Определение напряженного состояния в очаге деформации при поперечной обкатке

Напряжённые состояния в очаге деформации при поперечной обкатке гладкими плитами определены по схеме усилий (см. рис. 2.17).

Как известно, напряженное состояние заготовки в общем случае характеризуется шестью составляющими напряжения [5, 15] (рис. 2.19). Отсутствие или наличие лишь малых удлинений по оси заготовки позволяет решать данную задачу как плоскую. Таким образом, положим, что деформации вдоль оси z запрещены во всех точках поперечного сечения заготовки и напряжения от координаты z не зависят [28, 40]. Кроме того, примем, что материал заготовки несжимаемый. Из этих допущений следует, что:

$$\tau_{z\theta} = \tau_{z\rho} = 0; \quad \sigma_z = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2},$$

где $\tau_{z\theta}$, $\tau_{z\rho}$ – касательное напряжение, σ_z – осевое напряжение; σ_ρ – радиальное напряжение, σ_θ – тангенциальное напряжение.

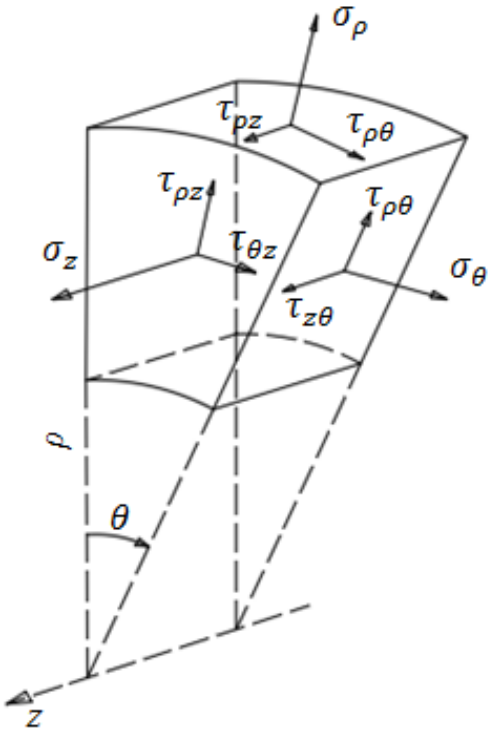


Рисунок 2.19 – Компоненты тензора напряжений в обычных осях цилиндрических деталей

Определение напряженного состояния для пластического слоя цилиндрического тела. В этом случае необходимо решить систему трех уравнений: два уравнения статического равновесия и условие пластичности [16, 19, 42, 44, 98]:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta}+\frac{\sigma_\rho-\sigma_\theta}{\rho}=0;\quad \frac{1}{\rho}\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta}+\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho}+\frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho}=0;\quad \sigma_\rho-\sigma_\theta=\nu K, \qquad (2.46)$$

где $\nu=\pm 1$, $K=\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{\text{т}}$ для случая энергетической теории предельного состояния, $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести, $\tau_{\rho\theta}$ – касательное напряжение.

Первое из уравнений системы (2.46) приведем к виду:

$$\frac{\partial}{\partial \rho}\left(\rho\sigma_\rho\right)-\sigma_\theta+\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta}=0.$$

Или с учетом последнего из уравнений системы (2.46)

$$\rho\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \rho}+\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta}=-\nu K.$$

После дифференцирования по θ получим:

$$\rho\frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \rho\partial \theta}=-\frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta^2}.$$

Второе из уравнений системы (2.46) после дифференцирования по ρ приводится к виду:

$$\rho\frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \rho\partial \theta}=-\rho^2\frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho^2}-3\rho\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho}.$$

Приравнивая правые части последних двух равенств, будем иметь

$$\rho^2\frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho^2}+3\rho\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho}-\frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta^2}=0.$$

Решение этого уравнения будем искать в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от ρ, а другая только от θ:

$$\tau_{\rho\theta}=\Phi(\rho)\cdot\varphi(\theta)=\Phi\cdot\varphi. \qquad (2.47)$$

С учетом этого можно записать:

$$\rho^2\frac{\Phi''}{\Phi}+3\rho\frac{\Phi'}{\Phi}-\frac{\varphi''}{\varphi}=0.$$

Пусть $\frac{\varphi''}{\varphi}=m^2;\ \rho^2\frac{\Phi''}{\Phi}+3\rho\frac{\Phi'}{\Phi}=m^2,$ (2.48)

где m – некоторое постоянное число.

Первое уравнение из уравнений (2.48) перепишем так: $\varphi'' - m^2\varphi = 0$. Его решение будет иметь вид: $\varphi = Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}$.

Решение уравнения $\rho^2\Phi'' + 3\rho\Phi' - m^2\Phi = 0$ будем искать в форме $\Phi = C\rho^n$. Отсюда $\Phi' = Cn\rho^{n-1}$; $\Phi'' = Cn(n-1)\rho^{n-2}$.

Подставляя выражения Φ, Φ', Φ'' во второе уравнение системы (2.48), получим его характеристическое уравнение: $n^2 + 2n - m^2 = 0$. Отсюда

$$n_1 = -1 + \sqrt{1+m^2} = a; \qquad n_2 = -1 - \sqrt{1+m^2} = b. \tag{2.49}$$

Таким образом: $\Phi = C_1\rho^a + C_2\rho^b$.

Подставив выражения функций φ и Φ в выражение (2.47), находим:

$$\tau_{\rho\theta} = (C_1\rho^a + C_2\rho^b)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right). \tag{2.50}$$

Первое из уравнений системы (2.46) с учетом условия пластичности и равенства (2.50) приобретает вид:

$$\frac{\partial\sigma_\rho}{\partial\rho} = -m\cdot(C_1\rho^a + C_2\rho^b)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) - \frac{\nu K}{\rho}.$$

После интегрирования получаем:

$$\sigma_\rho = -m\cdot\left(\frac{C_1\rho^a}{a} + \frac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) - \nu K ln(\rho) + f(\theta). \tag{2.51}$$

Возьмем теперь второе дифференциальное уравнение равновесия из системы (2.46) и перепишем его следующим образом:

$$\frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta} = -\rho\frac{\partial\tau_{\rho\theta}}{\partial\rho} - 2\tau_{\rho\theta}.$$

Принимая во внимание выражение (2.50), находим:

$$\frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta} = -[C_1(a+2)\rho^a + C_2(b+2)\rho^b]\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right).$$

Из соотношений (2.49) имеем: $a + 2 = \frac{m^2}{a}$; $b + 2 = \frac{m^2}{b}$, поэтому:

$$\frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta} = -m^2\cdot\left(\frac{C_1\rho^a}{a} + \frac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right).$$

$$\sigma_\theta = -m\cdot\left(\frac{C_1\rho^a}{a} + \frac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) + f_1(\rho). \tag{2.52}$$

На основании уравнений (1.53) и (1.54) имеем:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = -\nu K ln(\rho) + f(\theta) - f_1(\rho).$$

Условие пластичности, как известно, было записано в виде: $\sigma_\rho - \sigma_\theta = \nu K$.

Приравнивая правые части последних двух равенств, получаем:

$$-\nu K ln(\rho) + f(\theta) - f_1(\rho) = \nu K.$$

Отсюда следует, что $f(\theta) = const$, и поэтому:

$$f_1(\rho) = -\nu K(ln(\rho) + 1) + C.$$

Таким образом, имеем следующую систему уравнений для определения компонентов тензора напряжений в пластическом слое цилиндрического тела ($r_к \le \rho \le r$):

$$\begin{cases} \tau_{\rho\theta} = (C_1\rho^a + C_2\rho^b)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right); \\ \sigma_\rho = -m \cdot \left(\dfrac{C_1\rho^a}{a} + \dfrac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) - \nu K ln(\rho) + C\ ; \\ \sigma_\theta = -m \cdot \left(\dfrac{C_1\rho^a}{a} + \dfrac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) - \nu K(ln(\rho) + 1) + C; \\ \sigma_z = -m \cdot \left(\dfrac{C_1\rho^a}{a} + \dfrac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) - \nu K\left(ln(\rho) + \dfrac{1}{2}\right) + C, \end{cases} \quad (2.53)$$

C = константа.

Определение напряженного состояния для упругого ядра цилиндрического тела. В этом случае необходимо решить систему трех уравнений: два уравнения статического равновесия и условие упругости [16, 37, 42, 44, 63]:

$$\frac{\partial\sigma_\rho}{\partial\rho} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_{\rho\theta}}{\partial\theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \quad \frac{1}{\rho}\frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta} + \frac{\partial\tau_{\rho\theta}}{\partial\rho} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0; \quad \sigma_\rho - \sigma_\theta = \nu K n\frac{\rho}{r}, \quad (2.54)$$

где величина $n = \frac{r}{r_к}$,

r – радиус пластически деформируемой оболочки; $r_к$ – радиус упругого ядра.

Аналогично вышеизложенному решим систему уравнений (2.54) и получим компоненты тензора напряжений в упругом ядре цилиндрического тела ($0 \le \rho \le r_к$):

$$\begin{cases} \tau_{\rho\theta} = (C_1\rho^a + C_2\rho^b)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right); \\ \sigma_\rho = -m \cdot \left(\dfrac{C_1\rho^a}{a} + \dfrac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) - \nu Kn\dfrac{\rho}{r} + \nu K\left(ln\left(\dfrac{n}{r}\right) + 1\right) + C; \\ \sigma_\theta = -m \cdot \left(\dfrac{C_1\rho^a}{a} + \dfrac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) - 2\nu Kn\dfrac{\rho}{r} + \nu K\left(ln\left(\dfrac{n}{r}\right) + 1\right) + C; \\ \sigma_z = -m \cdot \left(\dfrac{C_1\rho^a}{a} + \dfrac{C_2\rho^b}{b}\right)\left(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}\right) - \dfrac{3}{2}\nu Kn\dfrac{\rho}{r} + \nu K\left(ln\left(\dfrac{n}{r}\right) + 1\right) + C, \end{cases} \quad (2.55)$$

C = константа.

Определение напряженного состояния в зонах, подвергающихся непосредственному воздействию инструмента. Зона заготовки, подвергающаяся непосредственному воздействию рабочего инструмента, изображена на рис. 2.17 заштрихованными областями.

Схема усилий при поперечной обкатке гладкими плитами, приложенных со стороны плит к заготовке представлена на рис. 2.17. В каждой точке поверхности контакта заготовки с плитами действуют нормальное усилие P и сила трения F. Угол θ соответствует зоне контакта. Ввиду малой величины угла θ можно принять (см. рис. 2.17 и рис. 2.19):

$$\sigma_\rho \approx P; \qquad \tau_{\rho\theta} \approx F. \quad (2.56)$$

Связь между удельным давлением и удельной силой трения примем в таком виде:

$$F = \mu \cdot P,$$

где μ – коэффициент трения.

При этом на основании формулы (2.56): $F = \mu \cdot \sigma_\rho$.

На основании опытов [16, 37, 42] было установлено, что касательные напряжения уменьшаются по мере перехода от периферии заготовки к центру ее сечения так, что в центре заготовки, во всяком случае, они не могут быть бесконечно велики. На этом основании в первом равенстве (2.55) можно принять: $C_2 = 0$.

Пусть: $C_3 = C_1 \cdot A$ и $C_4 = C_1 \cdot B$, тогда система уравнения (2.53) компонентов тензора напряжений ($r_к \le \rho \le r$) имеет вид:

$$\begin{cases} \tau_{\rho\theta} = \rho^a\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right); \\ \sigma_\rho = -m \cdot \dfrac{\rho^a}{a}\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right) - \nu K ln(\rho) + C\ ; \\ \sigma_\theta = -m \cdot \dfrac{\rho^a}{a}\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right) - \nu K(ln(\rho) + 1) + C; \\ \sigma_z = -m \cdot \dfrac{\rho^a}{a}\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right) - \nu K\left(ln(\rho) + \dfrac{1}{2}\right) + C. \end{cases} \quad (2.57)$$

и система уравнения (2.55) компонентов тензора напряжений ($0 \le \rho \le r_к$):

$$\begin{cases} \tau_{\rho\theta} = \rho^a\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right); \\ \sigma_\rho = -m \cdot \dfrac{\rho^a}{a}\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right) - \nu K n \dfrac{\rho}{r} + \nu K\left(ln\left(\dfrac{n}{r}\right) + 1\right) + C; \\ \sigma_\theta = -m \cdot \dfrac{\rho^a}{a}\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right) - 2\nu K n \dfrac{\rho}{r} + \nu K\left(ln\left(\dfrac{n}{r}\right) + 1\right) + C; \\ \sigma_z = -m \cdot \dfrac{\rho^a}{a}\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right) - \dfrac{3}{2}\nu K n \dfrac{\rho}{r} + \nu K\left(ln\left(\dfrac{n}{r}\right) + 1\right) + C\ . \end{cases} \quad (2.58)$$

Напряжения на поверхности контакта определим приближенно, положив в основу такой задачи гипотезу плоских сечений, но связь между касательными и нормальными напряжениями на поверхности контакта примем в виде:

$$\tau_{\rho\theta} = \mu \cdot \sigma_{\rho.}$$

Проектируя на ось ρ все силы, действующие на элемент тела, приравниваем их нулю. Разрешая это уравнение совместно с условием пластичности, получаем:

$$\sigma_{\rho.} = -K e^{-\mu\theta}. \quad (2.59)$$

При $\rho = r$, из второго равенств (2.57) и (2.59) получаем:

$$-m \cdot \frac{r^a}{a}\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right) - \nu K ln(r) + C = -K e^{-\mu\theta}.$$

Отсюда следует, что:

$$\begin{cases} C_4 = 0; \\ C_3 = -\dfrac{K \cdot a}{\mu r^a}\ ; \\ C = \nu K ln(r); \\ m = \mu\ . \end{cases} \quad (2.60)$$

Поставляя эти выражения в равенства (2.57), (2.58) получаем следующие выражения напряжений.

Напряженные состояния в пластической оболочке ($r_к \le \rho \le r$):

$$\begin{cases} \frac{\tau_{\rho\theta}}{K} = -\frac{a}{\mu}\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta}; \\ \frac{\sigma_\rho}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu ln\left(\frac{r}{\rho}\right); \\ \frac{\sigma_\theta}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(ln\left(\frac{r}{\rho}\right) - 1\right); \\ \frac{\sigma_z}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(ln\left(\frac{r}{\rho}\right) - \frac{1}{2}\right). \end{cases} \quad (2.61)$$

Напряжения состояния в упругом ядре ($0 \le \rho \le r_к$):

$$\begin{cases} \frac{\tau_{\rho\theta}}{K} = -\frac{a}{\mu}\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta}; \\ \frac{\sigma_\rho}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(n\frac{\rho}{r} - ln(r) - 1\right); \\ \frac{\sigma_\theta}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(2n\frac{\rho}{r} - ln(r) - 1\right); \\ \frac{\sigma_z}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(\frac{3}{2}n\frac{\rho}{r} - ln(r) - 1\right). \end{cases} \quad (2.62)$$

В равенства (2.61) и (2.62) входит величина $a = \sqrt{1+m^2} - 1 = \sqrt{1+\mu^2} - 1$, величину θ можно рассчитать по формуле $\theta = arccos\left(1 - \frac{2y}{D}\right)$ (см. рис. 2.17).

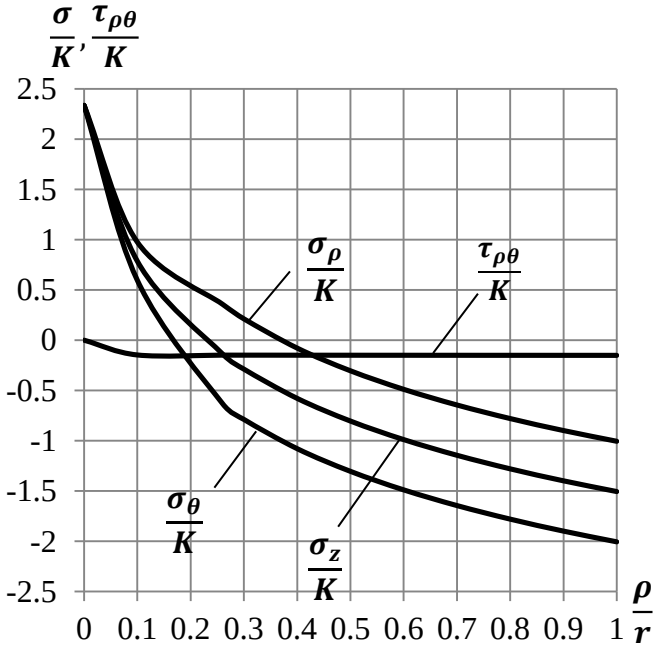


Рисунок 2.20 – Распределение напряжений в зонах, подвергающихся непосредственному воздействию инструмента при поперечной обкатке гладкими плитами (при D = 10 мм, y =0,1 мм, μ=0,15, n = 3,8)

На рис. 2.20 по формулам (2.61) и (2.62) построены эпюры нормальных и касательных напряжений, которые показывают, что в центре поперечного сечения

заготовки имеет место напряженное состояние всестороннего растяжения, а касательное напряжение равно нулю.

Определение напряженного состояния в зонах, не подвергающихся непосредственному воздействию инструмента. Зоны, не подвергающиеся непосредственному воздействию инструмента, изображены на рис. 2.17 не заштрихованными областями.

Для зон, не подвергающихся непосредственному воздействию инструмента, имеем следующие граничные условия:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = 0 \\ \tau_{\rho\theta} = 0 \end{cases} \qquad \text{при} \quad \rho = r. \qquad (2.63)$$

Принимая во внимание второе из равенств (2.63) на основании первого выражения (2.57), напишем для напряжения $\tau_{\rho\theta}$:

$$\tau_{\rho\theta} = \rho^{\sqrt{1+m^2}-1}\left(C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}\right) = 0.$$

Правая часть равенства при любых значениях θ, может быть равна нулю лишь при условии, если:

$$C_3 = C_4 = 0. \qquad (2.64)$$

Принимая во внимание (2.63) и (2.64), получим на основании второго из равенств (2.57)

$$C = \nu K ln(r). \qquad (2.65)$$

Поставляя равенств (2.64) и (2.65) в формулы (2.57) и (2.58), получим:

Напряженное состояние в пластическом слое ($r_к \le \rho \le r$):

$$\begin{cases} \dfrac{\sigma_\rho}{K} = -\nu ln\left(\dfrac{\rho}{r}\right); \\ \dfrac{\sigma_\theta}{K} = -\nu\left(ln\left(\dfrac{\rho}{r}\right) + 1\right); \\ \dfrac{\sigma_z}{K} = -\nu\left(ln\left(\dfrac{\rho}{r}\right) + \dfrac{1}{2}\right). \end{cases} \qquad (2.66)$$

Напряженное состояние в упругом ядре ($0 \le \rho \le r_к$)

$$\begin{cases} \dfrac{\sigma_\rho}{K} = -\nu\left(n\dfrac{\rho}{r} - ln(n) - 1\right); \\ \dfrac{\sigma_\theta}{K} = -\nu\left(2n\dfrac{\rho}{r} - ln(n) - 1\right); \\ \dfrac{\sigma_z}{K} = -\nu\left(\dfrac{3}{2}n\dfrac{\rho}{r} - ln(n) - 1\right). \end{cases} \quad (2.67)$$

На рис. 2.21 по формулам (2.66) и (2.67) построены эпюры напряжений по сечению цилиндра после поперечной обкатки гладкими плитами при диаметре заготовки *D* =10 мм, абсолютной обжатии *2y* = 0,2 мм, μ=0,15, *n* = 3,8.

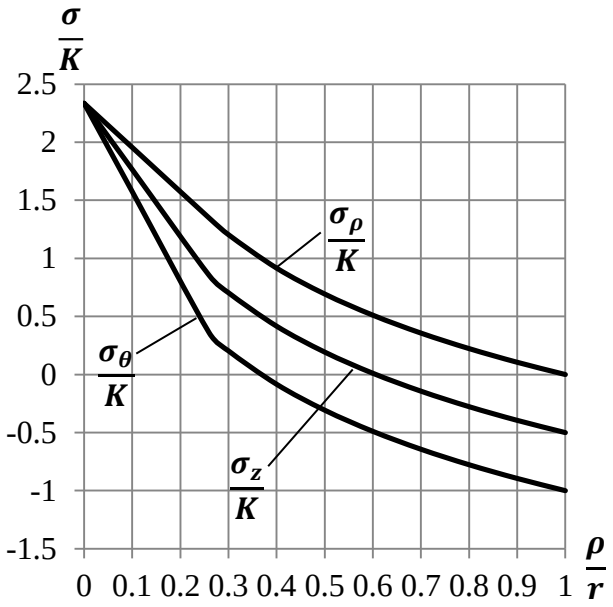


Рисунок 2.21 – Распределение напряжений в зонах, не подвергающихся непосредственному воздействию инструмента при поперечной обкатке гладкими плитами (при D = 10 мм, y =0,1 мм, μ=0,15, n = 3,8)

Тензор рабочих напряжений при поперечной обкатке гладкими плитами цилиндрической заготовки имеет вид:

$$\mathrm{T}_{\text{обк.}} = \begin{bmatrix} \sigma_\rho & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (2.68)$$

где σ_z, σ_ρ, σ_θ рассчитаем по формулам (2.61) и (2.62).

Из формул (2.26) и (2.68) и использование метода сложения тензоров напряжений, получены выражения тензора рабочих напряжений вала при поперечной обкатке гладкими плитами после правки поперечным изгибом:

$$\mathrm{T}_{\text{раб}} = \begin{bmatrix} \sigma_\rho & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^{\text{ост}}(y) + \sigma_z \end{bmatrix}.$$

2.5 Определения зоны упругой и пластической деформации при поперечной обкатке

Выражения (2.61) и (2.62) описывают напряженное состояние в зонах заготовки, которые подвергаются непосредственному воздействию рабочего инструмента. Уравнения (2.66) и (2.67) выражают напряженное состояние в зонах заготовки, которые не подвергаются непосредственному воздействию инструмента. Отличаются эти две системы уравнений тем, что в уравнениях (2.61) и (2.62) имеются одинаковые члены:

$$-\left(\frac{\rho}{r}\right)^{\sqrt{1+\mu^2}-1} \cdot e^{\mu\theta}.$$

представляющие собой величину напряжения от внешних сил.

Предположим, что нас интересует напряженное состояние в первый момент обработки. В этом случае напряжения от неравномерной деформации еще не получили развития. Поэтому, полагая в равенствах (2.61) и (2.62) соответствующие члены равными нулю, получим такие выражения для напряжений:

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = \frac{\sigma_\theta}{K} = \frac{\sigma_z}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^{\sqrt{1+\mu^2}-1} \cdot e^{\mu\theta}. \qquad (2.69)$$

Процесс воздействия плит в начале обкатки можно трактовать как процесс внедрения жесткого упруго напряженного клина в податливую пластическую массу остальной части тела, вследствие чего будет происходить ее пластическая деформация. Эта пластическая деформация осуществляется в периферийной части заготовки, где нормальные напряжения превосходят истинное сопротивление деформации тела. Границу распространения пластической деформации можно найти из условия [15, 16]:

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = \frac{\sigma_\theta}{K} = \frac{\sigma_z}{K} = -1$$

Принимая во внимание это условие, найдем из равенства (2.69)

$$\frac{\rho}{r} = e^{-\frac{\mu\theta}{\sqrt{1+\mu^2}-1}}. \qquad (2.70)$$

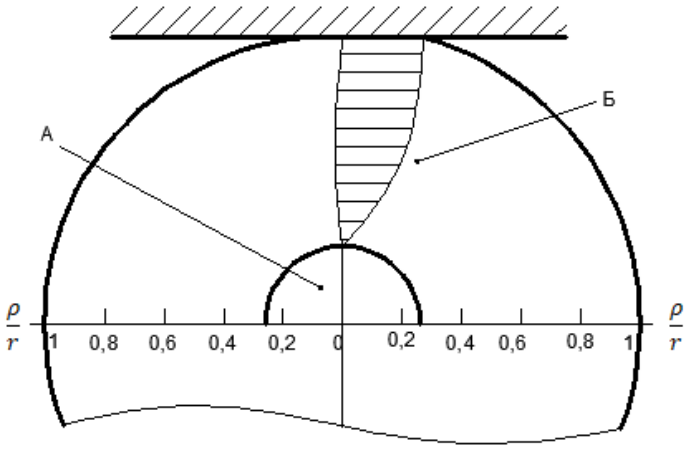
Из рис. 2.17 получим угол $\theta = arccos\left(1 - \frac{2y}{D}\right)$, (2.71)

где $\frac{2y}{D} \cdot 100\%$ – степень относительного обжатия.

Согласно [19, 30, 62] предел степени относительного обжатия для материала заготовки Ст45 с коэффициентом трения μ=0,15:

$$\frac{2y}{D} \cdot 100\% = \frac{2\mu^2}{2\mu^2 + 1} \cdot 100\% = 4{,}3\%.$$

По равенству (2.70), (2.71) построены кривые, характеризующие границу зон распространения пластической деформации при степени обжатия равной 2% в процессе поперечной обкатки гладкими плитами (рис. 2.22).



А – зона упругой деформации; Б – зона пластической деформации

Рисунок 2.22 – Зоны распределения пластической деформации (при Q = 2%)

На рис. 2.22 показано что, при степени относительного обжатия равной 2%, зона пластической деформации находится в пределе $0{,}26 \leq \frac{\rho}{r} \leq 1$ по сечению вала и радиус упругого ядра равен $r_к = 0{,}26r$.

2.6 Определение остаточных напряжений в цилиндрических деталях

Авторами работ [42, 63, 69] написаны основные уравнения теории упругости для плоской задачи в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \quad \frac{1}{\rho}\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0; \quad \nabla^2\left(\sigma_\rho + \sigma_\theta\right) = 0, \quad (2.72)$$

где, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial\rho^2} + \frac{\partial^2}{\partial\theta^2}$ – оператор Лапласа.

С помощью функции напряжений Эри $\varphi(\rho,\theta)$, получены следующие выражения для напряжения в цилиндрических координатах, при этом удовлетворяются все уравнения теории упругости (2.72) [4, 10]:

$$\sigma_\rho = \frac{1}{\rho}\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2}; \quad \sigma_\theta = \frac{\partial^2\varphi}{\partial\rho^2}; \quad \tau_{\rho\theta} = -\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial\varphi}{\partial\theta}\right). \tag{2.73}$$

Подставляя первое и второе уравнение равенств (2.73) в третье уравнение равенств (2.72), получим бигармоническое уравнение: $\nabla^4(\varphi) = 0$.

Бигармоническое уравнение $\nabla^4(\varphi) = 0$ в цилиндрической системе координат приобретает следующий вид:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}\right)\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2}\right) = 0. \tag{2.74}$$

После поперечной обкатки гладкими плитами получены цилиндрические детали, имеющие компоненты напряжений симметричного распределения, которые не зависят от угла θ (т. е. являются только функцией радиуса ρ), а касательное напряжение $\tau_{\rho\theta} = 0$. Тогда уравнение равновесия в цилиндрической системе координат:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0. \tag{2.75}$$

и выражение (2.74) можно переписать в виде:

$$\left(\frac{d^2}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{d}{d\rho}\right)\left(\frac{d^2\varphi}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{d\varphi}{d\rho}\right) = 0,$$

или

$$\frac{d^4\varphi}{d\rho^4} + \frac{2}{\rho}\frac{d^3\varphi}{d\rho^3} - \frac{1}{\rho^2}\frac{d^2\varphi}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho^3}\frac{d\varphi}{d\rho} = 0. \tag{2.76}$$

Решая линейное однородное дифференциальное уравнение (четвертый порядок типа Эйлера) (2.76), получим:

$$\varphi = Al n\rho + B\rho^2 l n\rho + C\rho^2 + D. \tag{2.77}$$

где *A, B, C, D = const.*

Из равенств (2.73), (2.75) и (2.77) компоненты напряжений определены по формулам:

$$\sigma_\rho = \frac{A}{\rho^2} + B(1 + 2ln\rho) + 2C;$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2\varphi}{\partial\rho^2} = \sigma_\rho - \frac{A}{\rho^2} + B(3 + 2ln\rho) + 2C. \qquad (2.78)$$

Для расчета величины остаточных напряжений, возникающих в цилиндре, в результате поперечной обкатки, сформулируем на основании условий статики и приведенных данных граничные условия [2, 18, 30]:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = 0 & \text{при} \quad \rho = r \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \nu\text{К} & \text{при} \quad \rho = r \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0 & \text{при } 0 \le \rho \le r_\text{к} \end{cases} \qquad (2.79)$$

Используя третье из граничных условий (2.79) в формулы (2.78), получим:

$$B = \frac{A}{r_\text{к}^2}. \qquad (2.80)$$

Используя первое и второе граничное условие (2.79) с использованием равенств (2.78) и (2.80), получим:

$$A = -\frac{\nu K r_\text{к}}{2\left[1 - \left(\frac{r_\text{к}}{r}\right)^2\right]}; \quad B = -\frac{\nu K}{2\left[1 - \left(\frac{r_\text{к}}{r}\right)^2\right]}; \; 2\text{C} = -\frac{\nu K}{2} + \frac{\nu K ln r}{\left[1 - \left(\frac{r_\text{к}}{r}\right)^2\right]}. \qquad (2.81)$$

Подставляя равенств (2.81) в формулы (2.78) с условием $\nu = \pm 1$, найдем выражение для остаточных напряжений в пластическом слое цилиндрического тела ($r_\text{к} \le \rho \le r$):

$$\frac{\sigma_\rho^\text{o}}{K} = \frac{2ln\frac{r}{\rho} - \left[\left(\frac{r_\text{к}}{\rho}\right)^2 - \left(\frac{r_\text{к}}{r}\right)^2\right]}{2\left[1 - \left(\frac{r_\text{к}}{r}\right)^2\right]}; \quad \frac{\sigma_\theta^\text{o}}{K} = \frac{2ln\frac{r}{\rho} - \left[2 - \left(\frac{r_\text{к}}{\rho}\right)^2 - \left(\frac{r_\text{к}}{r}\right)^2\right]}{2\left[1 - \left(\frac{r_\text{к}}{r}\right)^2\right]};$$

$$\frac{\sigma_z^\text{o}}{K} = \eta \cdot \left[\frac{2ln\frac{r}{\rho}}{\left[1 - \left(\frac{r_\text{к}}{r}\right)^2\right]} - 1\right]. \qquad (2.82)$$

где η – коэффициент Пуассона.

Если принять ($0 \le \rho \le r_к$), то будем иметь остаточные напряжения в упругом ядре цилиндрического тела:

$$\frac{\sigma_\rho^o}{K} = \frac{\sigma_\theta^o}{K} = \frac{ln\frac{r}{r_к}}{1-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2} - \frac{1}{2}; \quad \frac{\sigma_z^o}{K} = \eta \cdot \left[\frac{2ln\frac{r}{r_к}}{1-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2} - 1\right]. \qquad (2.83)$$

Из рис. 2.22 имеем величину $r_к/r$ = 0,26 при степени обжатия 2%. По равенствам (2.82), (2.83) построены эпюры остаточных напряжений после поперечной обкатки при степени относительного обжатия 2% и коэффициенте Пуассона η = 0,3 (рис. 2.23). Если коэффициент Пуассона η = 0,5, т.е. принимается условие постоянства объема, то эпюра осевого напряжения имеет вид, изображенный пунктиром.

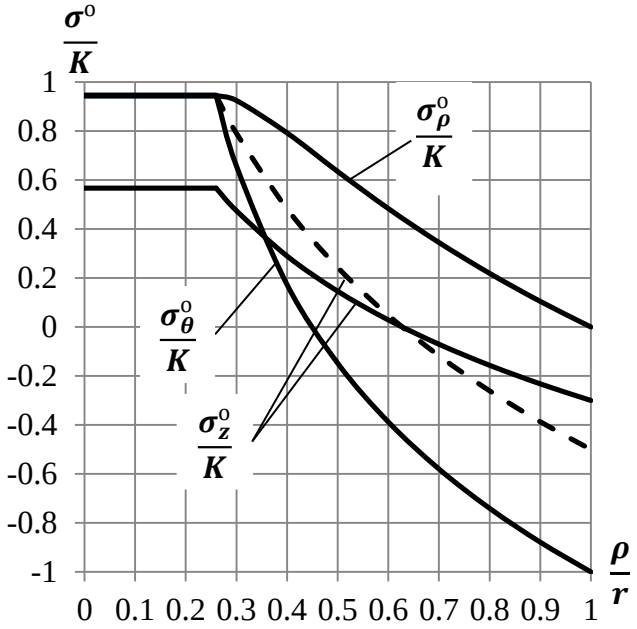


Рисунок 2.23 – Распределение остаточных напряжений по сечению цилиндра после поперечной обкатки гладкими плитами (при Q = 2%)

Из рис. 2.23 видно, что в центре поперечного сечения цилиндра формируют растягивающие остаточные напряжения. Наружные слои заготовки деформируются по толщине больше, чем внутренние. За счет уменьшения толщины периметр наружных слоев стремится возрасти, поэтому они испытывают стремление к отрыву от сердцевины вала. Это приводит к образованию растягивающих радиальных напряжений, максимальных в центре и равных нулю на периферии. Тан-

генциальные напряжения уравновешиваются радиальными, а осевые напряжения уравновешиваются между собой.

Растягивающие остаточные напряжения в центральной зоне цилиндра иногда могут достигать значительной величины и приводить к разрушению центральной части деталей. Эти напряжения являются следствием неравномерной деформации по сечению вала. Для оценки опасности появления трещин в центральной области цилиндра при ППД гладкими плитами, рассчитана интенсивность остаточного напряжения в центральной области цилиндра по формуле Губера-Мизеса [2, 70]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_\rho - \sigma_\theta\right)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_\rho\right)^2}. \qquad (2.84)$$

Из рис. 2.23 и по формуле (2.84), интенсивность остаточного напряжения в центральной области цилиндра равна нулю (при коэффициенте Пуассона η = 0,5) или весьма малы, меньше чем предел текучести материала ($\sigma_i = 0{,}4\sigma_т$ при коэффициенте Пуассона η = 0,3). Поэтому способ ППД поперечной обкаткой гладкими плитами исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области цилиндрических изделий.

Выводы по главе 2

1. Для определения основных параметров процесса ППД и напряженного состояния цилиндрических деталей разработана геометрическая модель процесса ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами с использованием математического аппарата, основанного на законах теории упругопластического твердого тела и теоретической механики.

2. По результатам аналитических расчетов получена зависимость предельного общего прогиба от величины исходного прогиба заготовки при правке поперечным изгибом. Правка поперечным изгибом с воздействием распределённой нагрузки на цилиндрическую деталь с величиной отношения *l/L = 0,7-0,8* дает значительно более равномерное распределение равновесных остаточных напря-

жений по длине детали, чем при действии сосредоточенной поперечной силы. Определено предельное значение коэффициента изгиба, которое находится в пределах от 5,3 до 5,5. Результаты расчетов могут быть рекомендованы к практическому использованию на производстве для достижения прецизионной точности нежестких деталей типа валов.

3. По результатам аналитических расчетов установлены рациональные режимы для выполнения процесса ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами: угол подъема α заходной части гладких плит находится в диапазоне 2° до 8°, максимальное значение абсолютного обжатия составляет 0,43 мм (при диаметре заготовки D = 10 мм). Получена зависимость предельного относительного обжатия Q от коэффициента трения μ в зоне контакта заготовки с инструментом. Полученные режимы обеспечивают процесс ППД обкаткой гладкими плитами.

4. По результатам аналитических расчетов установлено влияние степени относительного обжатия на характер распределения остаточных напряжений и величину зоны пластической деформации после поперечной обкатки гладкими плитами, что позволяет выбрать рациональную величину обжатия для выполнения процесса ППД на практике.

5. Результаты определения остаточных напряжений и зоны пластической деформации деталей после поперечной обкатки показали, что в центре поперечного сечения формируются растягивающие остаточные напряжения; глубина пластической деформации зависит от величины относительного обжатия. По результату расчета можно утверждать, что способ ППД выправленных цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области.

ГЛАВА 3 КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ППД И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАНИНОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Чтобы упростить решение сложных задач, изложенных в главе 2 и получить результаты большей точности, необходимо прибегнуть к помощи современных программных комплексов.

Линейка продуктов ANSYS, Inc., в том числе продукт Mechanical, позволяет решить практически любую задачу механики деформируемого твердого тела или получить сопряженное решение задачи механики с решением задач других областей физики, например гидрогазодинамики, теплопереноса или электромагнетизма.

Конечно-элементное моделирование позволяет уменьшить количество физических прототипов и испытаний, что ускоряет возврат инвестиций за счет уменьшения времени разработки, а также способствует развитию более гибкого процесса разработки, основанного на информации, и ведет к созданию инновационных и высококачественных продуктов и процессов производства. ANSYS Mechanical – лучшее в своем классе решение для проектирования оптимизации конструкций. Набор функций данного продукта позволяет решать широчайший спектр задач практически из любых областей, учитывая все отечественные и зарубежные нормы проектирования, а также решать задачи оптимизации.

С помощью программного комплекса ANSYS рассмотрено напряженное состояние выправленных цилиндрических деталей при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами. В результате получено распределение остаточных напряжений по сечению цилиндрических деталей и влияние основных параметров ППД на напряженно-деформированное состояние выправленных цилиндрических деталей.

3.1 Метод расчета напряженно-деформированного состояния деталей при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами

Для численного определения напряженно-деформированного состояния деталей и влияния основных параметров ППД на напряженное состояние и геометрические формы изделий использован метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS Workbench.

Для решения поставленной задачи необходимо осуществить несколько этапов конечно-элементного моделирования процесса ППД.

Этап 1. Математическая постановка задачи (выбор математической модели). На этом этапе проводится выбор уравнений, описывающих исследуемый процесс. Как правило, это дифференциальные уравнения в частных производных. Например, уравнения движения сплошной среды, уравнение теплопроводности, уравнения электростатики и др. В ANSYS [2, 98] этот этап осуществляется на стадии выбора расчетного модуля (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Расчетные модули в ANSYS Workbench

Также необходимо выбрать определение соотношений или уравнений состояния, описывающих модель материала и т.д.

Можно создать новый блок инженерного анализа в проекте двумя способами: кликнув и удерживая нажатой левую кнопку мыши перетащить его наименование из окна Toolbox в окно Project Schematic или двойным нажатием левой кнопки мыши на наименовании инженерного анализа в окне Toolbox. Для моделирования процесса ППД выправленных цилиндрических деталей гладкими плитами должно выбрать модуль Transient Structural или Static Structural.

Этап 2. Создание (импорт) геометрической модели исследуемого объекта.

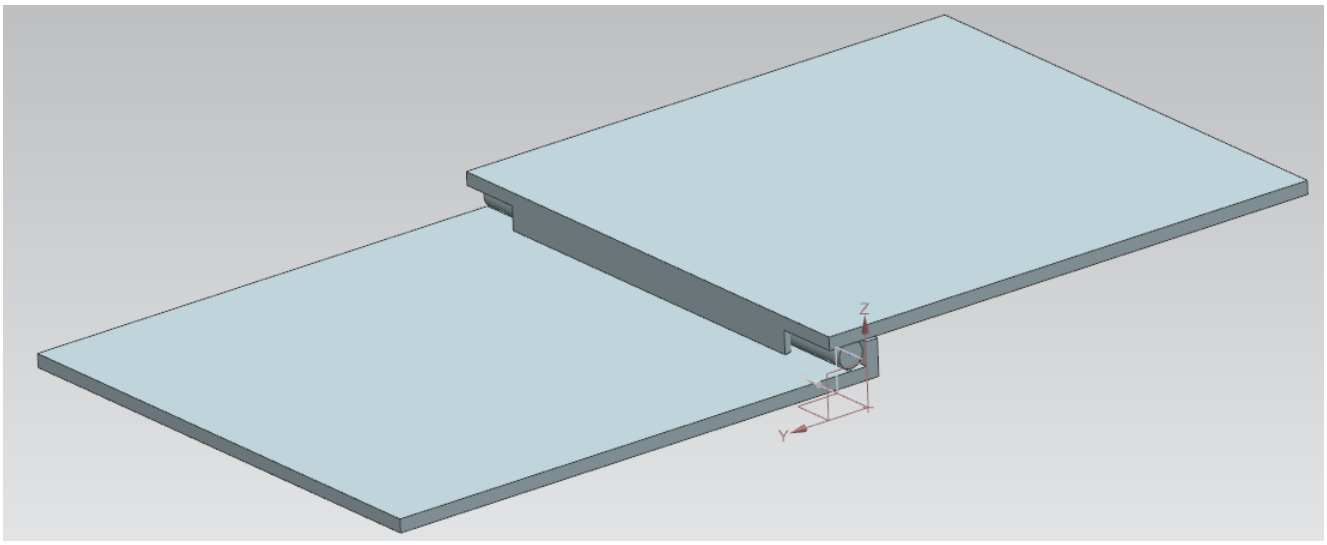


Рисунок 3.2 – Геометрическая модель процесса ППД в системе NX 10

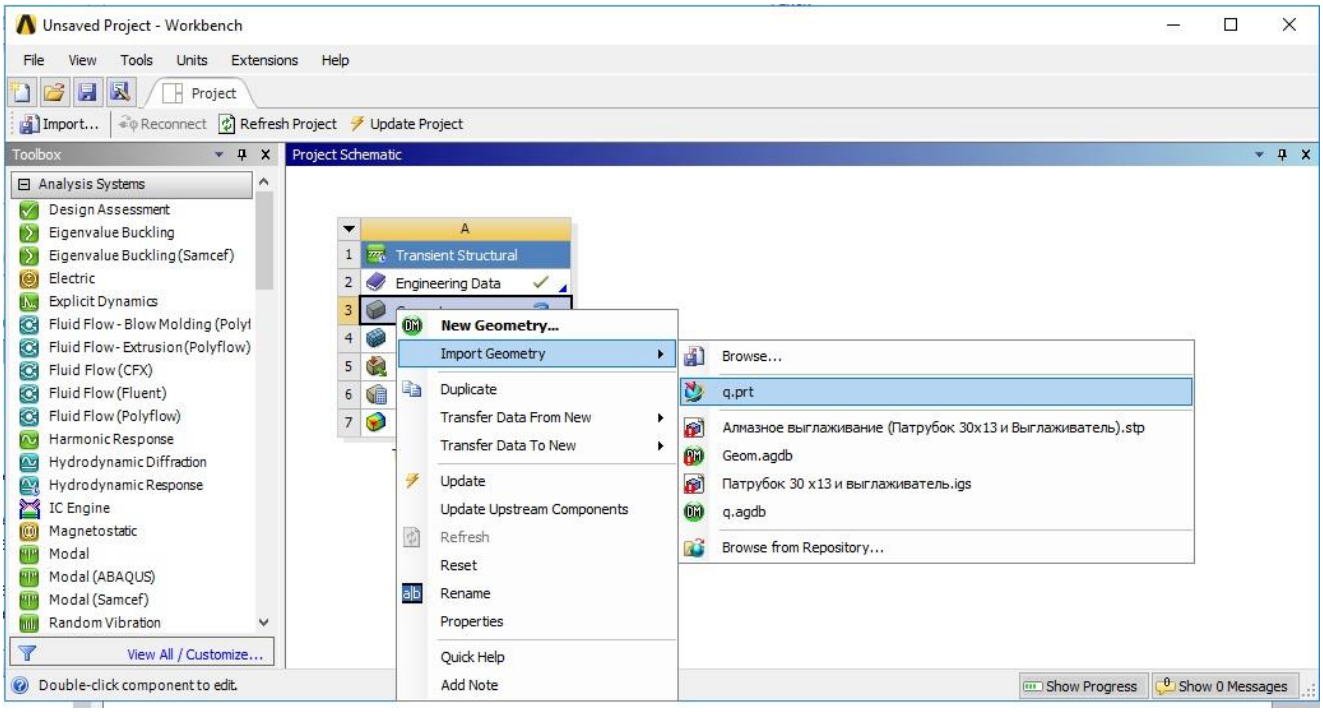


Рисунок 3.3 – Процесс импорта геометрической модели в расчетные модули ANSYS workbench

На данном этапе необходимо определиться с расчетной областью, с ее размерностью и способом создания или импорта в расчетный модуль. В нашем слу-

чае, построение геометрической модели (рис. 3.2) в системе Unigraphics NX 10 [101] и импортировали в расчетные модули ANSYS workbench (рис. 3.3).

Этап 3. Задание свойств и моделей материалов. После импорта геометрической модели в расчетные модули необходимо определить модели материалов, участвующих в расчете объектов. Задание свойств материалов осуществляется в соответствии с выбранной моделью материала. Для выбора и задания свойств материалов кликнув нажатой левую кнопку мыши на элемент Engineering Data. Модель материала может быть выбрана из библиотеки моделей или добавлена в библиотеку пользователем самостоятельно с помощью ввода констант, задания кривой деформирования, описывающей поведение материала и т.д.

В нашем случае в качестве обрабатываемого материала принята сталь 45 (рис. 3.4). Для стали 45 упругопластическая, изотропная упрочняющаяся; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$; диаграмма деформирования материала – билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_т = 360$ МПа, модулем упругости $E = 2x10^5$ МПа и модулем упрочнения $E_т = 6{,}8x10^3$ МПа. А для плиты выбраны типы жестких материалов (rigid).

	A	B	D
1	Contents of Engineering Data		Description
2	Material		
3	Ст 45		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 3: Ст 45

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7826	kg m^-3		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio			
5	Young's Modulus	2E+05	MPa		
6	Poisson's Ratio	0.3			
7	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
8	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		
9	Field Variables				
13	Bilinear Isotropic Hardening				
14	Yield Strength	360	MPa		
15	Tangent Modulus	6800	MPa		

Рисунок 3.4 – Механические свойства стали 45

Этап 4. Постановка контактных условий. Для решения задач механики, гидромеханики и других нужно ставить контактные условия между взаимодей-

ствующими объектами. Это вносит дополнительную нелинейность в постановку задачи. Определение поверхности контакта и напряжений в месте контакта является основной целью моделирования контактного взаимодействия.

В ANSYS типы контактных условий, представлены в задачах теории упругости. Имеется 5 типов контактных условий:

– Bonded – целевая и контактная поверхности сцепляются по всем направлениям;

– No separation – целевая и контактная поверхности сцепляются, но проскальзывание разрешено;

– Frictionless – контакт без трения;

– Frictional – контакт с трением, нелинейный контакт;

– Rough – «грубый» фрикционный контакт с отсутствием скольжения.

В нашем случае использован контакт типа Frictional. При этом нужно показать контактную (вал) и целевую (плиты) поверхности. В первоначальном анализе их поверхности контактируют без зазора и без натяга. В процессе качения коэффициент трения между плитами и валом принят $\mu = 0{,}15$.

Этап 5. Создание вычислительной сетки. Вычислительная сетка создается на всей расчетной модели. В плоском случае вычислительная сетка может быть треугольной или четырехугольной. Пространственная сетка – тетраэдрическая или гексаэдрическая. Чем качественнее построена вычислительная сетка, тем точнее и качественнее результат расчета.

Если множество узлов сетки упорядочено, то такая сетка называется структурированной или регулярной. Регулярные сетки требуют более длительного этапа подготовки геометрической модели и времени на создание сетки. При этом регулярные сетки обычно дают более качественные результаты. Более того, регулярная гексаэдрическая сетка содержит меньшее количество элементов и узлов, чем аналогичная тетраэдрическая сетка.

Для получения численного решения необходимо выполнить разбиение геометрических моделей конечно-элементной сеткой. Данная процедура выполняется в модуле симуляции Mechanical или CFD. Задаем определенный метод разбие-

ния. Для этого правой кнопкой мыши щелкаем на пункте Mesh в дереве проекта, в появившемся меню выбираем Insert->Method. Новый метод появляется в пункте Mesh. Принята пространственная сетка – гексаэдрическая форма для вала и плит. Выбран способ Multizone для вала и Automated для плит. После выполнения всех процедур необходимо нажать правую мышь, выполнять команду Generate, чтобы создать конечные вычислительные сетки. Конечно-элементная модель процесса ППД валов гладкими плитами содержит 9030 элементов и 40036 узлов.

Этап 6. Постановка краевых условий. Краевые условия включают в себя граничные и начальные условия. Начальные условия ставятся в случае решения нестационарной задачи. В качестве граничных условий могут выступать скорость потока на входе в канал (сосуд), температура на границе, перемещения на границе, сила, давление, потенциал на аноде и катоде и д.р.

Далее приведем краевые условия в ANSYS Workbench. В ходе расчета выполнено моделирование процесса обкатки вала между плитами. Принципиальным отличием динамической задачи от статической является сохранение полной истории напряженного состояния обработанного материала с учетом как предшествующих, так и последующих проходов деформирующего элемента. Поэтому, в качестве граничных условий приняты типы закрепления «Joints →Body-Ground→Genaral» для верхней плиты, с помощью которого можно задавать необходимое перемещение. А для фиксирования нижней плиты приняты тип закрепления «Joints →Body-Ground→Fixed». Вал прокатывается между плитами и вращается вокруг своей оси Oz. Поэтому приняты для всех перемещений (Translation X, Y, Z – Free) и вращение по оси Oz (Rotations – Free Z). Аналогично, граничные условия для верхней плиты: Translation X – Free для изменения значения абсолютного обжатия; Translation Y – Free для назначения величины перемещения обкатки; Translation Z – Fixed и не вращения для всех осей (Rotations – Fixed).

Этап 7. Настройка решателя. На данном этапе осуществляется выбор типа решателя: выбирается решатель для динамических задач, устанавливается количество итераций, шагов по времени, общее время расчета, геометрическая не-

линейность (конечные деформации), выбирается прямой или итерационный решатель. Осуществляется также настройка записи результатов расчетов.

Этап 8. Запуск на расчет. На этапе запуска на расчет выполняется настройка количества используемых ядер, задаются параметры перезапуска расчета и другие характеристики. Перед тем, как запустить решение, добавляем в ветку *Solution* срезы для тех величин, которые нам необходимо посмотреть. Срезы можно добавлять и после того, как расчеты были проведены. Далее запускаем расчет напряженно деформированного состояния командой *Solve* контекстного меню ветки *Solution* или *Transient Structural*. Задавал температуру по умолчанию 22° C (*Transient Structural* → Options → Environment Temperature → 22° C)

Этап 9. Анализ результатов. После окончания расчета выбираем нужный нам срез для просмотра результатов. На данном этапе осуществляется анализ результатов численных расчетов. В зависимости от задачи и требований к результатам может выполняться вывод результатов на экран, в таблицу, в виде графика, в файл.

Математическое моделирование напряжено-деформированного состояния. Решение упругопластической задачи осуществлялось с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Исследуемая область представляет совокупность конечных элементов формы – гексаэдр (рис. 3.5).

Конечно-элементная сетка содержит 9030 элементов. Ее структура принята, исходя из имеющихся машинных ресурсов. Топология сетки (количество узлов, их связи) в ходе решения задачи сохраняется неизмененной.

Компоненты перемещений. Смещение поля в трехмерном элементе с использованием функций формы N_i [2, 98]:

$$u = \sum_{i=1}^{8} N_i u_i \ ; \quad v = \sum_{i=1}^{8} N_i v_i \ ; \ w = \sum_{i=1}^{8} N_i w_i \ , \tag{3.1}$$

в которой $u_i,\ v_i, w_i$ являются узловыми значениями смещения на элементе, а N является количество узлов на этом элементе. Формулы (3.1) в матричной форме имеет вид:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}_{3\times1} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots \end{bmatrix}_{3\times24} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \end{Bmatrix}_{24\times1} . \quad (3.2)$$

Матрицы (3.2) можно представить в виде:

$$u = N \cdot d.$$

где N – матрица узлов элемента; d – вектор узлового смещения.

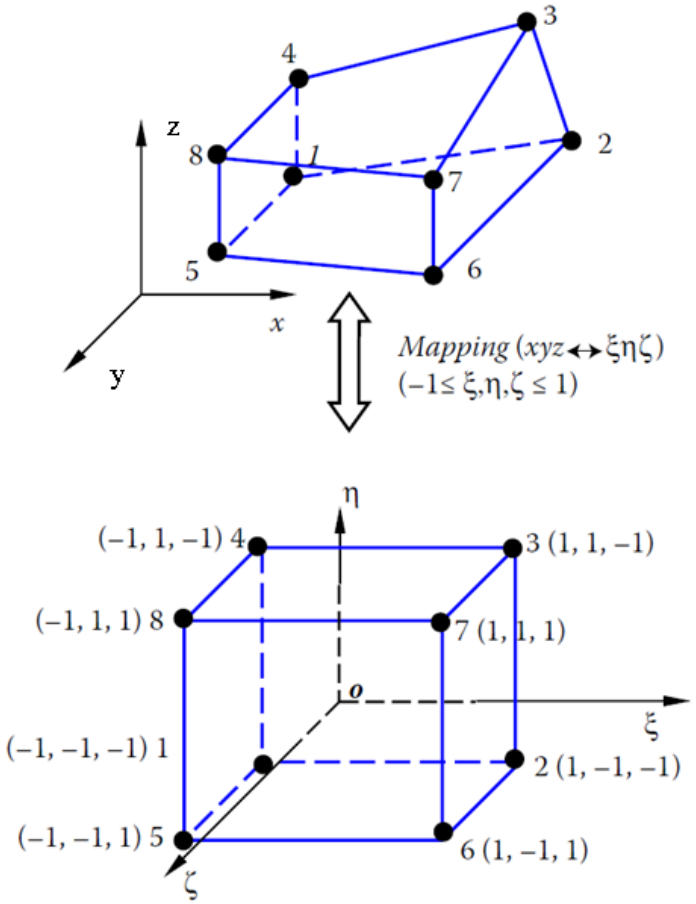


Рисунок 3.5 – Отображение элемента в естественную систему координат

Функции формы:

$$N_1(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta),$$

$$N_2(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta),$$

$$N_3(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta),$$

$$\vdots \qquad\qquad \vdots$$

$$N_8(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta).$$

где N_1, N_2, N_3, … N_8 – узлы элемента.

Имеем следующие отношения для функций формы:

$$N_i(\xi_i,\eta_i,\zeta_i)=\delta_{ij}, \quad i,j=1,2,\dots,8.$$

$$\sum_{i=1}^{8} N_i(\xi_i,\eta_i,\zeta_i)=1.$$

Преобразование координат (картографирование):

$$x=\sum_{i=1}^{8} N_i x_i\,, \quad y=\sum_{i=1}^{8} N_i y_i\,, \quad z=\sum_{i=1}^{8} N_i z_i. \tag{3.3}$$

То есть для геометрии элемента используются те же функции формы, что и для перемещения поля. Этот вид элемента называется изопараметрическим элементом. Преобразование между (ξ, η, ζ) и (x, y, z), описываемыми уравнением (3.2), называется изопараметрическим отображением (см. рис. 3.5), имеем следующие уравнения:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial u}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix}.$$

где J – Якобинская Матрица.

Обращая это соотношение, имеем:

$$\begin{matrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{matrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial u}{\partial \zeta} \end{Bmatrix}. \tag{3.4}$$

где $\frac{\partial u}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^{8} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} u_i$, и так далее, аналогично для v и w. Эти отношения приводят к следующему выражению для деформации:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix}. \quad (3.5)$$

Используя соотношения, приведенные в уравнениях (3.2), (3.4) и (3.5), мы можем вывести вектор деформации для получения:

$$\varepsilon = B \cdot d.$$

в которой B – матрица, связывающая вектор узлового смещения d с вектором деформации ε.

Энергия деформации оценивается как:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma^{\mathrm{T}} \varepsilon dV = \frac{1}{2} \int_V (E\varepsilon)^{\mathrm{T}} \varepsilon dV = \frac{1}{2} d^{\mathrm{T}} \left[\int_V B^{\mathrm{T}} E B dV \right] d.$$

где σ^{T} – транспонированная матрица напряжения σ.

То есть матрица жесткости элемента:

$$k = \int_V B^{\mathrm{T}} E B dV.$$

В системе координат $O\xi\eta\xi$ (см. рис. 3.5):

$$dV = (\det J) d\xi d\eta d\,\zeta.$$

Следовательно,

$$k = \int_{-1}^{1} \int_{-1}^{1} \int_{-1}^{1} B^{\mathrm{T}} E B \, (\det J) d\xi d\eta d\,\zeta.$$

Легко проверить, что размеры этой матрицы жесткости составляют 24 × 24.

Для вычисления напряжений в элементе используется следующее соотношение, как только вектор смещения узла известен для этого элемента:

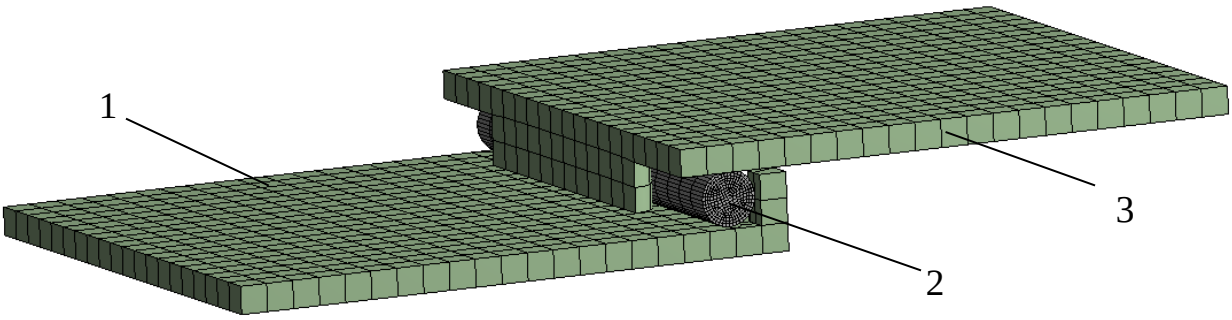
$$\sigma = E\varepsilon = EBd.$$

Напряжения оцениваются в выбранных точках (гауссовых точках или узлах) на каждом элементе. Значения напряжения в узлах часто являются прерывистыми и менее точными. Усреднение напряжений от окружающих элементов вокруг узла часто используется для сглаживания результатов поля напряжений.

3.2 Численное определение напряжено-деформированного состояния цилиндрических деталей при ППД

Влияние основных параметров процесса ППД на остаточные напряжения в выправленных цилиндрических деталях исследовали методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS [2, 98], предназначенной для математического моделирования различных физических процессов. Моделирование процесса ППД в программе ANSYS позволяет определить напряженно-деформированное состояние заготовки, что необходимо при разработке оптимального технологического процесса.

Для численного определения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в выправленных деталях при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами построена конечно-элементная модель в виде цилиндра и двух плит в программе ANSYS Workbench (рис. 3.6). Использованы следующие геометрические параметры заготовки и плит для моделирования: цилиндр диаметром 10 мм, длиной 200 мм с максимальным прогибом 0,5 мм из стали Ст45 (предел текучести $\sigma_т$ = 360 МПа и модуль упругости E = $2*10^5$ МПа); рабочие плиты имеют размеры 5х200х210 мм и считаются абсолютно жесткими (rigid) [30, 31, 33].



1 – неподвижная плита; 2 – заготовка; 3 – подвижная плита

Рисунок 3.6 – Конечно-элементная модель процесса ППД выправленных цилиндрических деталей

Параметры моделирования:

– конечно-элементная форма – гексаэдр, сгущение 9030 элемента, 40036 узлов;

– коэффициент трения между заготовкой и плитами μ= 0,15;

– граничные условия: жесткое фиксирование нижней плиты;

По формуле (2.44) для ППД цилиндрического заготовки диаметром D = 10 мм максимальное значение абсолютного обжатия ΔH = 0,43 мм.

Степень относительного обжатия Q рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{\Delta H}{D} \cdot 100\%.$$

Зависимость между исходным ($f_{\text{исх}}$) и общим ($f_{\text{общ}}$) прогибом можно представить в виде:

$$f_{\text{общ}} = \xi \cdot f_{\text{исх}},$$

где ξ – коэффициент изгиба.

По экспериментальным данным [42] на практике получены предельные значения коэффициентов изгиба от 5,3 до 5,5 для всех случаев жесткости вала при правке поперечным изгибом. Поэтому для выправления цилиндра с прогибом 0,5 мм, общий прогиб будет равен 2,65 мм.

Режимы обработки: верхняя плита перемещается вправо 2,65 мм (общий прогиб равен 2,65 мм), далее происходит перемещение плиты в первоначальное положение и происходит выправление в направлении заготовки. В работе исполь-

зованы абсолютные обжатия величиной: ΔH = 0,05; 0,07; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4, что соответствуют степени относительного обжатия: Q = 0,5; 0,7; 1; 2; 3; 4%. Верхняя плита перемещается влево на 62,83 мм (заготовка поворачивается на 1 оборот) и перемещается вверх на 1 мм (происходит процесс разгрузки).

Напряженное состояние в зоне деформации. Изменение интенсивности рабочих напряжений в очаге деформации при ППД выправленной цилиндрической заготовки поперечной обкаткой гладкими плитами, показано на рисунке 3.7 (при Q = 1,5 %). Этот процесс можно разделить на 5 этапов (см. рис. 1.32): А – правка поперечным изгибом, Б – разгрузка после правки изгибом, В – поперечное сжатие цилиндра, Г – поперечная обкатка за один оборот цилиндра, Д – разгрузка после поперечной обкатки [30, 32].

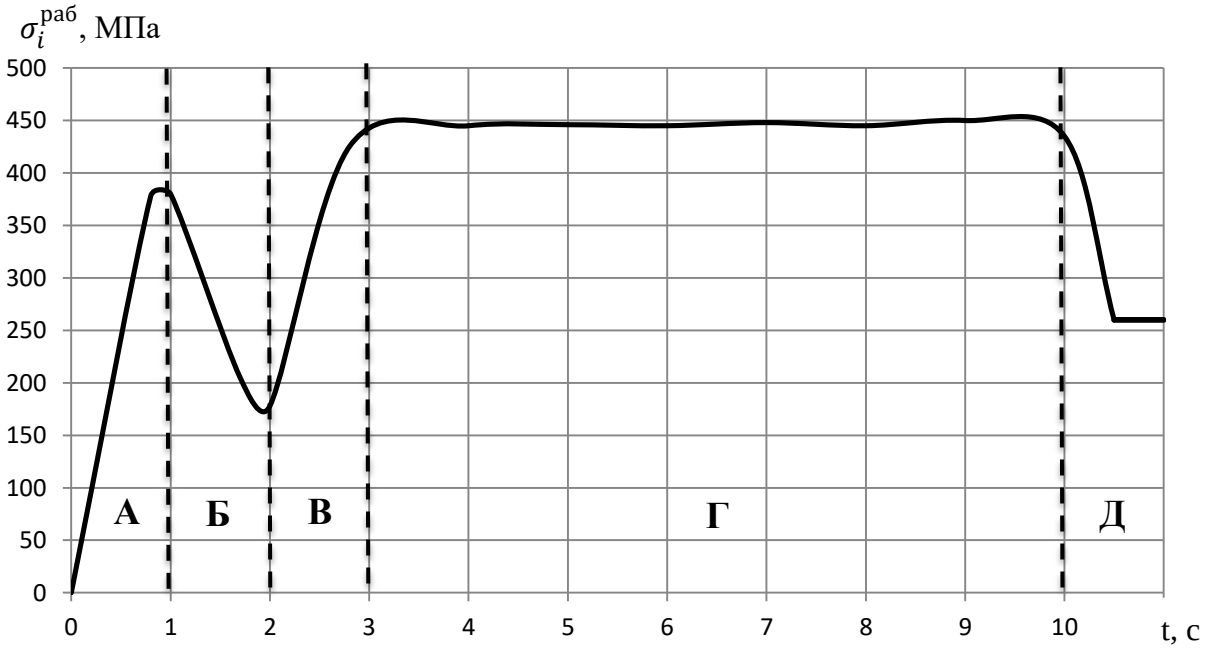
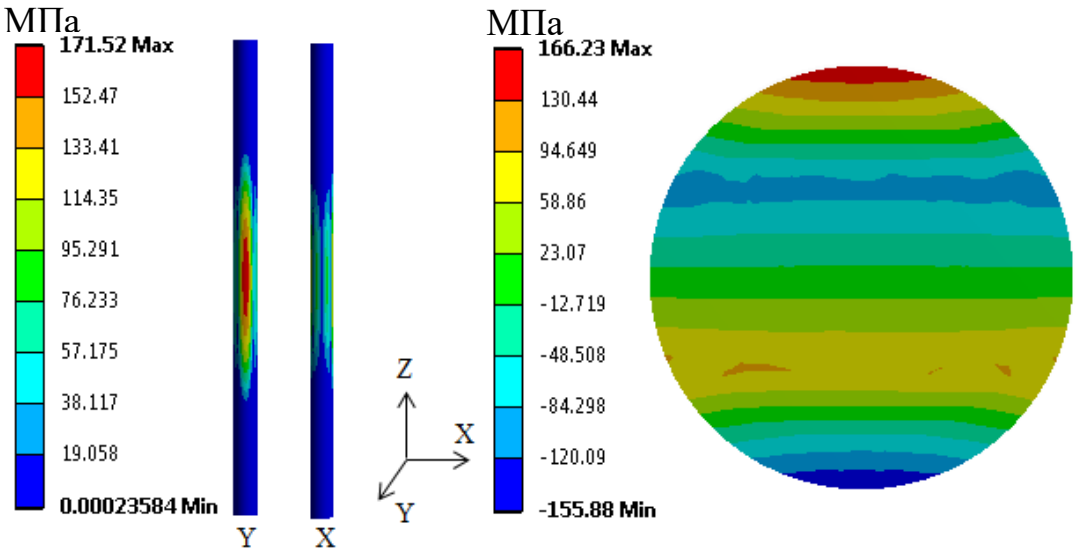


Рисунок 3.7 – Изменение интенсивности рабочих напряжений при ППД цилиндрической заготовки поперечной обкаткой гладкими плитами

При правке цилиндра поперечным изгибом воздействием распределенной нагрузки рабочие напряжения монотонно увеличиваются до 380 МПа, достигая предела текучести, и вызывают пластическую деформацию. Затем происходит разгрузка, интенсивность напряжений составляет 171 МПа. Далее при поперечном сжатии цилиндра рабочие напряжения возрастают до 435 МПа. На этапе по-

перечной обкатки рабочие напряжения остаются постоянными, равные примерно, 440 – 445 МПа. При окончательной разгрузке рабочие напряжения монотонно уменьшаются до уровня интенсивности остаточных напряжений, которые остаются в готовых деталях и составляют 279 МПа.

На рис. 3.8 показаны поля остаточных напряжений после выправления деталей поперечным изгибом при воздействии распределённой нагрузки (l/L = 0,75). Видно, что после правки поперечным изгибом формируются неравновесные напряжения по всему объему заготовки и с течением времени форма детали может снова исказиться. Для выравнивания напряжённого состояния нежестких цилиндрических деталей предлагается дополнительно обрабатывать заготовки способом поверхностного пластического деформирования, основанным на поперечной обкатке гладкими плитами.



а) б)

Рисунок 3.8 – Остаточные напряжения после правки деталей поперечным изгибом: а – распределение интенсивности остаточных напряжений по длине вала, б – осевые остаточные напряжения в поперечном сечении (в середине вала).

На рис. 3.9 показаны остаточные напряжения после поперечной обкатки при степени относительного обжатия Q = 1,5 %. В результате расчетов установлено, что после поперечной обкатки гладкими плитами формируются равновесные

остаточные напряжения, как по поперечному сечению (рис. 3.9), так и по длине заготовки (рис. 3.14). Это положительно сказывается на стабильности формы цилиндрических деталей малой жесткости.

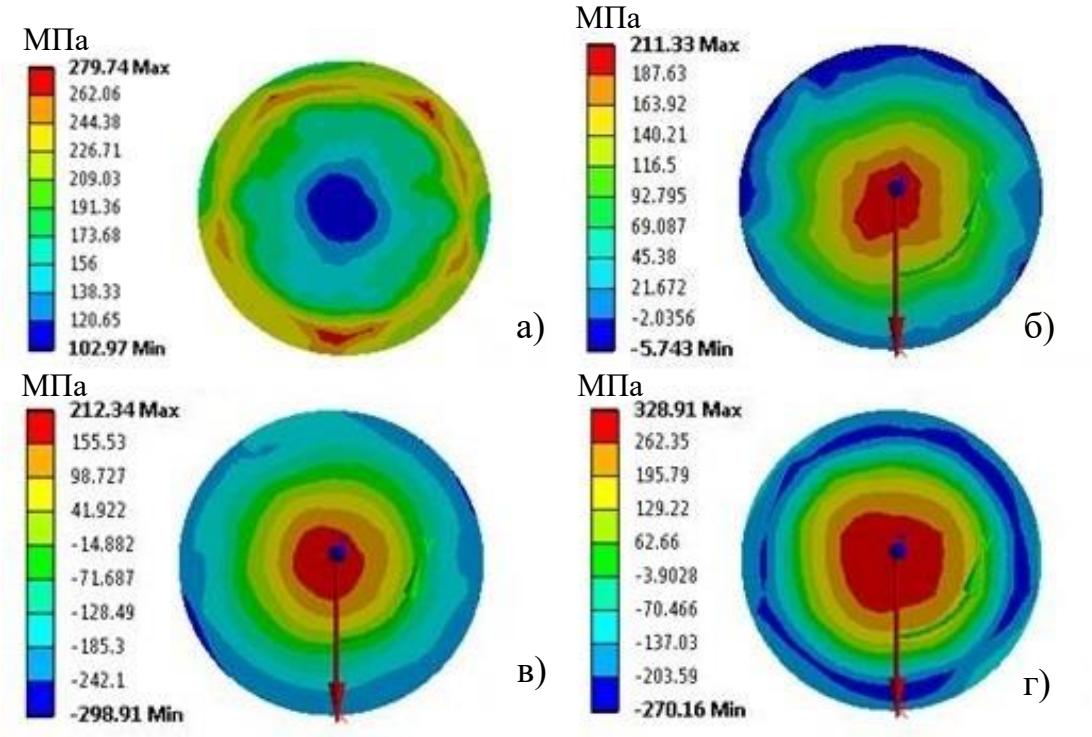


Рисунок 3.9 – Поля распределения интенсивности и компонентов тензора остаточных напряжений после поперечной обкатки гладкими плитами:

а – интенсивность остаточных напряжений; б – радиальные напряжения;

в – тангенциальные напряжения; г – осевые напряжения

Из рис. 3.9 видно, что в центральной зоне поперечного сечения заготовки формируются растягивающие остаточные напряжения. В каждом слое по сечению цилиндра формируются одинаковые остаточные напряжения. На рисунке 3.9 а) показано, что интенсивность остаточных напряжений монотонно возрастают от центра до подповерхностных слоев, затем незначительно уменьшается на поверхности детали. Возникают растягивающие радиальные напряжения, максимальные в центре и равные нулю на периферии (см. рис. 3.9 б). Распределение тангенциальных и осевых остаточных напряжений происходит по одинаковому закону: в центральной зоне – действуют растягивающие, а на поверхности – сжимающие напряжения (см. рис. 3.9 в, г).

3.3 Влияние основных параметров процесса ППД на напряженное состояние и глубину пластической деформации

Рассмотрим некоторые результаты численного расчета по определению влияния механических свойств материала и параметров процесса ППД поперечной обкаткой гладкими плитами на напряженное состояние деталей.

Влияние физико-механических свойств материала. Физико-механические свойства материала оказывают существенное влияние на упруго-пластическую деформацию деталей. Способность изменения формы и размеров деталей характеризуется деформационными свойствами: упругостью и пластичностью. Основные характеристики упругопластических свойств материалов – это модуль упругости (E) и предел текучести ($\sigma_т$). Чтобы оценить влияние механических свойств материала на напряженное состояние выправленных цилиндрических деталей при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами, выполнено моделирование этого процесса ППД цилиндров из разных материалов диаметром 10 мм и длиной 200 мм с максимальным прогибом 0,5 мм при величине абсолютного обжатия ΔH=0,15 мм (Q=1,5%). Материал заготовок, выбранных из разных групп металлов, представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Физико-механические свойства материалов

Материал заготовки		Предел текучести ($\sigma_т$, ГПа)	Модуль упругости (E, ГПа)
Мягкий	Магниевый сплав	193	45
	Алюминиевый сплав	280	71
Вязкий	Медный сплав	280	110
	Конструкционная сталь	250	200
Труднообрабатываемый	Титановый сплав	930	96
	Нержавеющий сплав	210	193

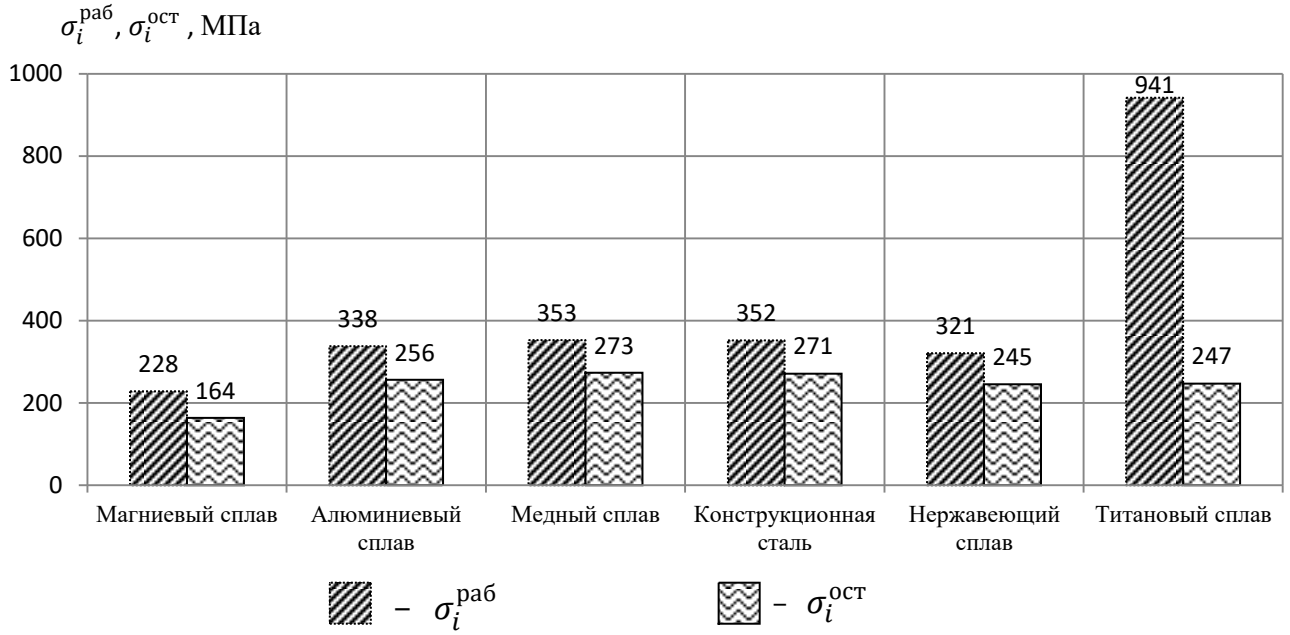


Рисунок 3.10 – Зависимость максимальных значений интенсивности рабочих и остаточных напряжений от разных материалов

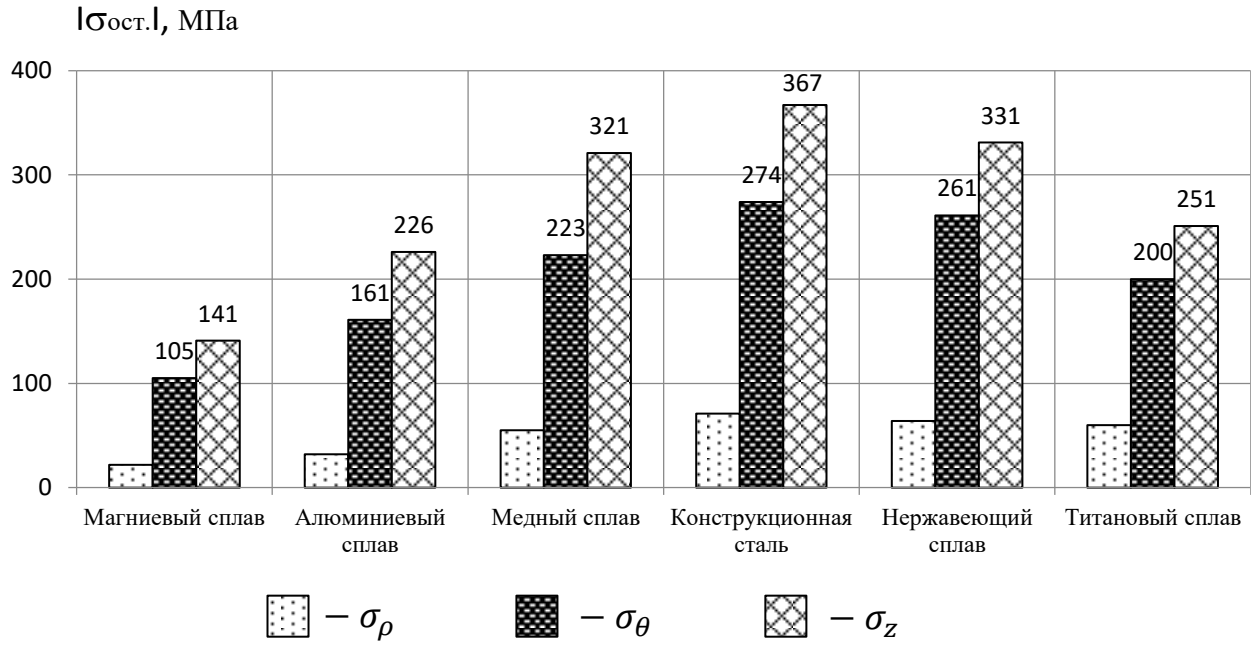


Рисунок 3.11 – Зависимость абсолютных значений компонентов максимальных остаточных напряжений сжатия от разных материалов

На рисунках 3.10 и 3.11 показано влияние механических свойств материала на максимальные значения интенсивности рабочих и остаточных напряжений, абсолютные значения компонентов максимальных остаточных напряжений. Из двух

диаграмм видно, что рабочие напряжения в основном зависят от предела текучести металла, а при повышении предела текучести ($\sigma_т$) и модуля упругости (E) приводят к формированию остаточных напряжений с большими значениями величин.

Влияние величины абсолютного обжатия. Величины абсолютного обжатия (ΔH=2y), выбранные с учетом ограничений условия (2.44), последовательно равны 0,05; 0,07; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4 мм для материала сталь 45. Эти величины абсолютного обжатия соответствуют степеням относительного обжатия 0,5; 0,7; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4%.

На рисунке 3.12 показаны компоненты напряжений в цилиндрических координатах: радиальные σ_ρ, тангенциальные σ_θ и осевые напряжения σ_z. Напряженное состояние цилиндра можно оценить по интенсивности напряжения σ_i, предложенное Мизесом и рассчитается по формуле (2.84).

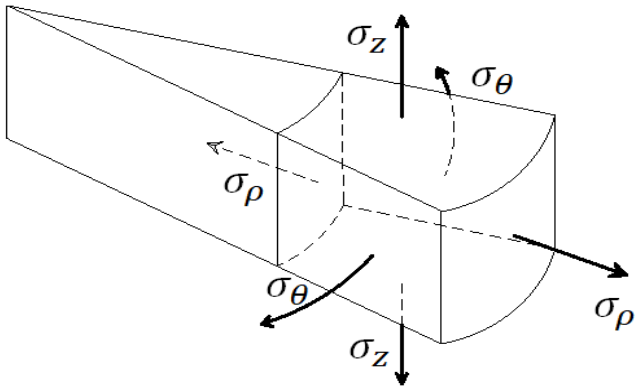


Рисунок 3.12 – Компоненты напряжений в цилиндрической системе координата

Зависимость интенсивности рабочих напряжений, формирующихся при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами, от величины абсолютного обжатия ΔH показана на рисунке 3.13.

В очаге деформации интенсивность рабочих напряжений пропорционально растет при увеличении Q до 0,7 %, достигая значения 410 МПа, а затем незначительно повышается при увеличении Q до 2,5 %. При значении Q меньше 0,5 % рабочие напряжения оказываются меньше предела текучести $\sigma_т$ (360 МПа) и поэто-

му в данном случае ожидается только упругая деформация. При значении Q больше 2,5 % рабочие напряжения оказываются больше предела прочности $\sigma_{\text{в}}$ (600 МПа) и поэтому при таких режимах обработки возможно разрушение материала.

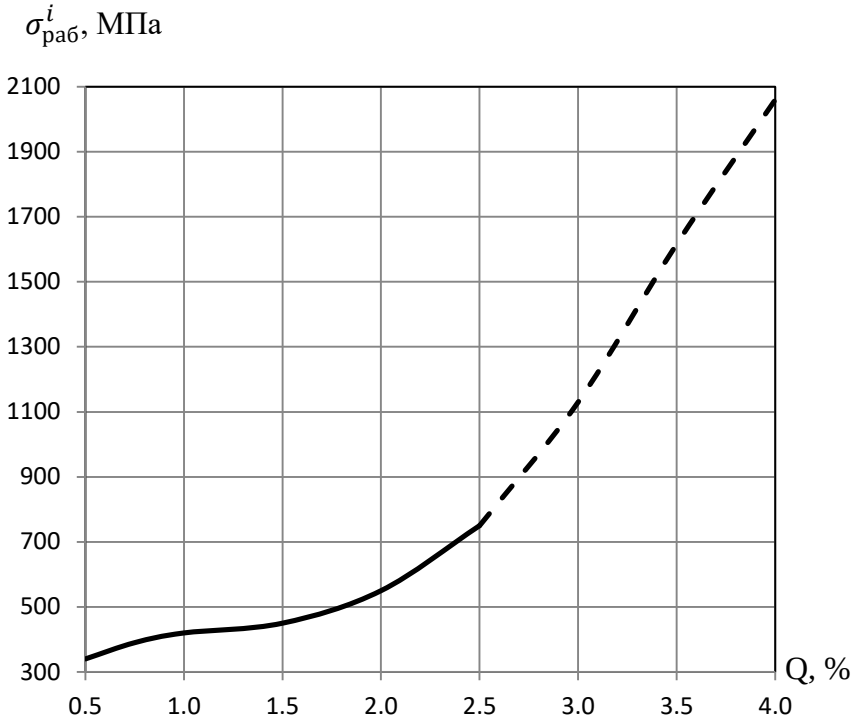


Рисунок 3.13 – Зависимость интенсивности рабочих напряжений от абсолютного обжатия

На рисунке 3.14 показаны поля распределения интенсивности остаточных напряжений при различных значениях абсолютных обжатий после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами. Видно что, при степени относительного обжатия меньше 0,5 %, получена неравномерная интенсивность остаточных напряжений после ППД (рис. 3.14 а). При значениях степени относительного обжатия находящегося в диапазоне 0,7-2,0 % получено равномерное распределение напряжений. При значениях степени относительного обжатия больше 2,5 %, на поверхности заготовки может быть происходить разрушение материала (см. рис. 3.14 ж), з)). На рис. 3.14 д), е) показано, что после ППД интенсивность остаточных напряжений распределена равномерно, но максимальное значение превышает предел текучести материала, поэтому возможно разрушение материала. Таким образом, ра-

циональное значение степени относительного обжатия находится в диапазоне Q = 0,7-2,5 %.

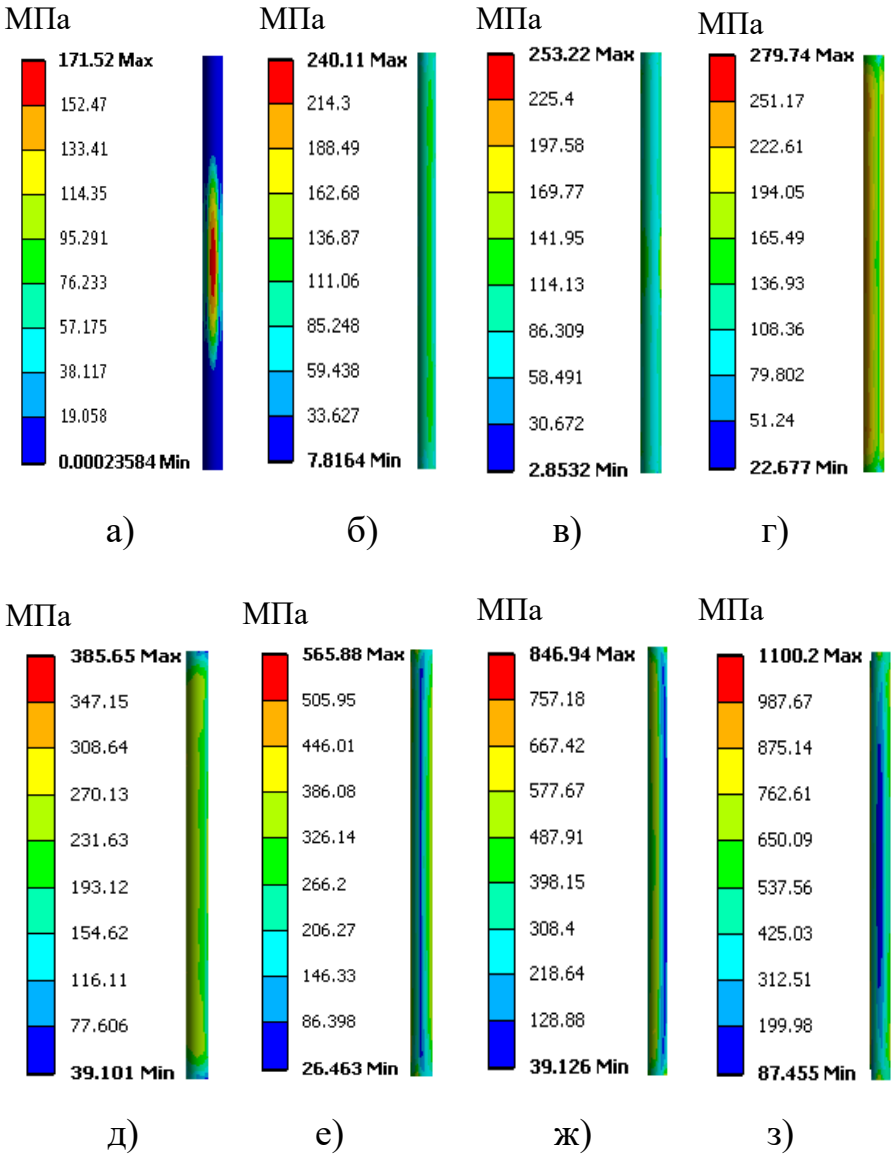


Рисунок 3.14 – Распределение интенсивности остаточных напряжений после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами при Q (%):

а) 0,5; б) 0,7; в) 1,0; г) 1,5; д) 2,0; е) 2,5; ж) 3,0; з) 4,0

По результатам моделирования получена зависимость максимальных остаточных напряжений ($\sigma_i^{max}, \sigma_\rho^{max}, \sigma_\theta^{max}, \sigma_z^{max}$) от степени относительного обжатия (см. рисунок 3.15). Из рисунка 3.15 видно, что с увеличением степени относительного обжатия максимальные остаточные напряжения монотонно возрастают. При степени относительного обжатия Q > 2,5% максимальная интенсивность

остаточных напряжений значительно превышает предел текучести материала и поэтому при таких режимах обработки возможно разрушение материала.

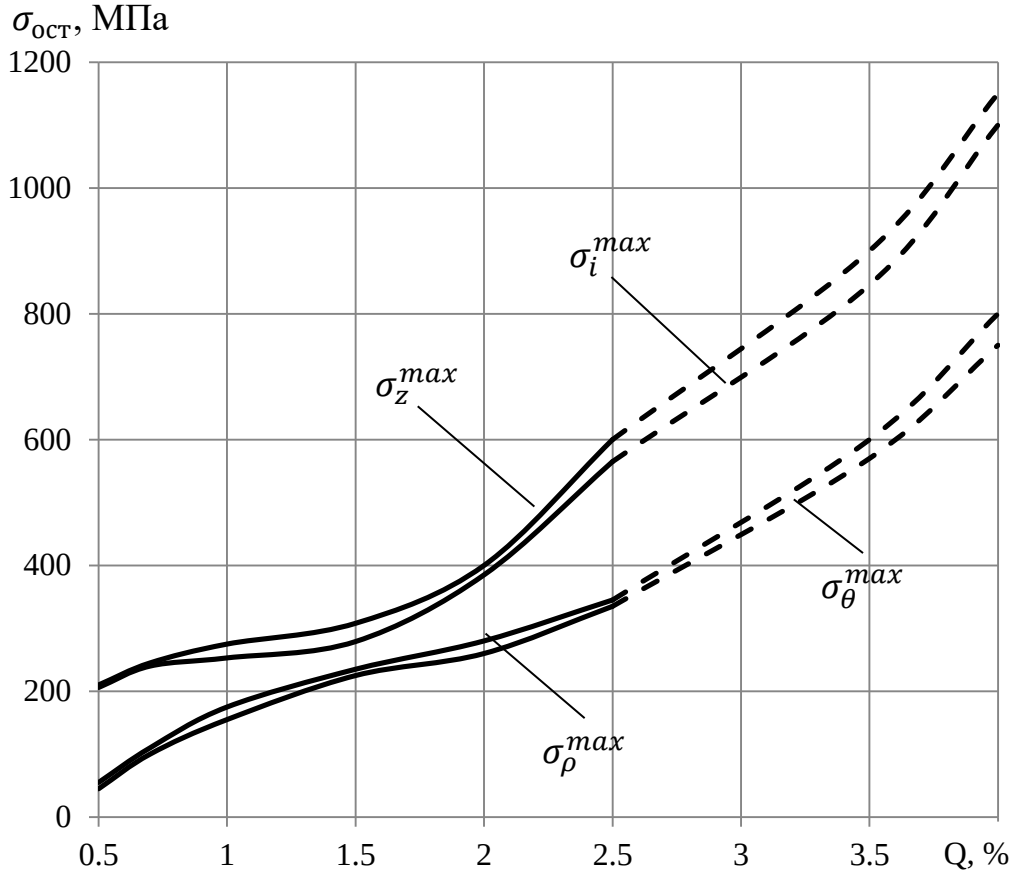


Рисунок 3.15 – Зависимость максимальных остаточных напряжений от степени относительного обжатия: σ_i^{max} – максимальные интенсивности напряжения, σ_ρ^{max}, σ_θ^{max}, σ_z^{max} – максимальные растягивающие радиальные, тангенциальные, осевые напряжения

При ППД гладкими плитами необходимо исследовать остаточные напряжения в центральной зоне цилиндрической заготовки, так как при больших пластических деформациях они могут достигать величин прочности материала. При Q = 2,5 % максимальное растягивающее радиальное напряжение σ_ρ^{max} равно примерно 85% от придела текучести $\sigma_т$, а максимальное тангенциальное напряжение σ_θ^{max} = 90% от $\sigma_т$. При относительном обжатии Q < 0,7% рабочее напряженное состояние не превышают предела упругости материала, поэтому процесса выравнивания напряжении не происходит. При дальнейшем увеличении Q до 2,5 % интенсив-

ность максимальных остаточных напряжений σ_i^{max} увеличивается в небольшой степени, а при Q > 2,5 % быстро возрастает. При этом компоненты растягивающих радиальных напряжений в центре цилиндра монотонно повышаются. Следовательно, для формирования благоприятных остаточных напряжений рациональное значение степени относительного обжатия при поперечной обкатке находится в диапазоне 0,7–2,5%. При относительном обжатии Q = 1,5% максимальное осевое напряжение сжатия у поверхности достигает -270 МПа и максимальное напряжение растяжения в центре цилиндра составляет 328 МПа (см. рисунок 3.9).

Рассмотрим распределение компонентов остаточных напряжений по сечению выправленного цилиндра после ППД с рациональными значениями относительного обжатия Q = 0,7–2,5%. На рисунке 3.16 показано, что радиальные остаточные напряжения по сечению цилиндра монотонно возрастают по направлению к центру детали.

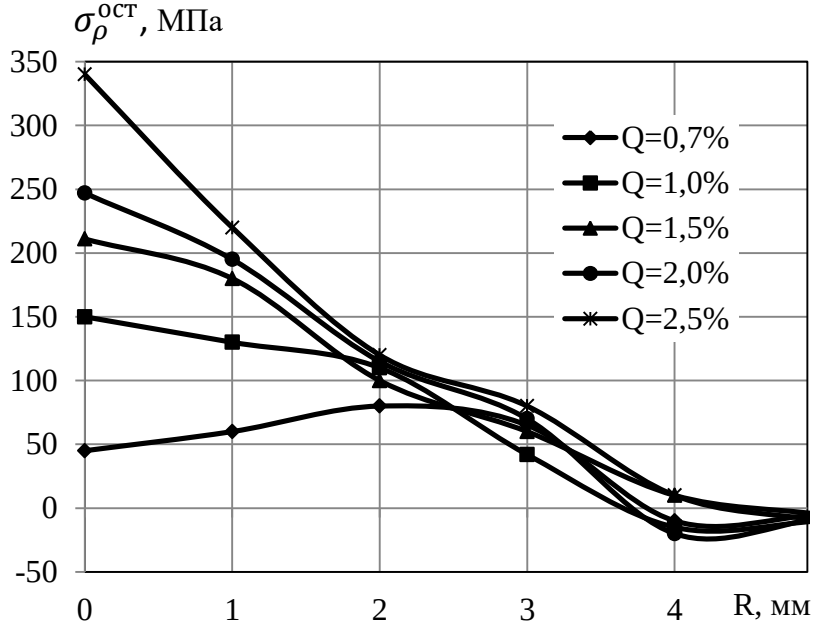


Рисунок 3.16 – Распределение радиальных остаточных напряжений по сечению цилиндрических деталей

При всех значениях величин относительных обжатий, после ППД по сечению деталей почти всегда формируются в основном растягивающие радиальные остаточные напряжения и незначительные сжимающие радиальные остаточные

напряжения в поверхностных слоях. При повышении величины относительного обжатия максимальные растягивающие радиальные напряжения в центре цилиндра увеличиваются. С обжатием Q=0,5 – 1% максимальные радиальные напряжение равны 45 – 150 МПа составляют от 12 до 40% от предела текучести материала $\sigma_т$. С увеличением степени относительного обжатия (Q) максимальные радиальные напряжения возрастают. При Q = 2 – 2,5% максимальные радиальные напряжения равны 250 – 340 МПа, что составляют от 70 до 94% от $\sigma_т$. Формирование таких больших значений растягивающих остаточных напряжений в цилиндрических детях – это нежелательный фактор.

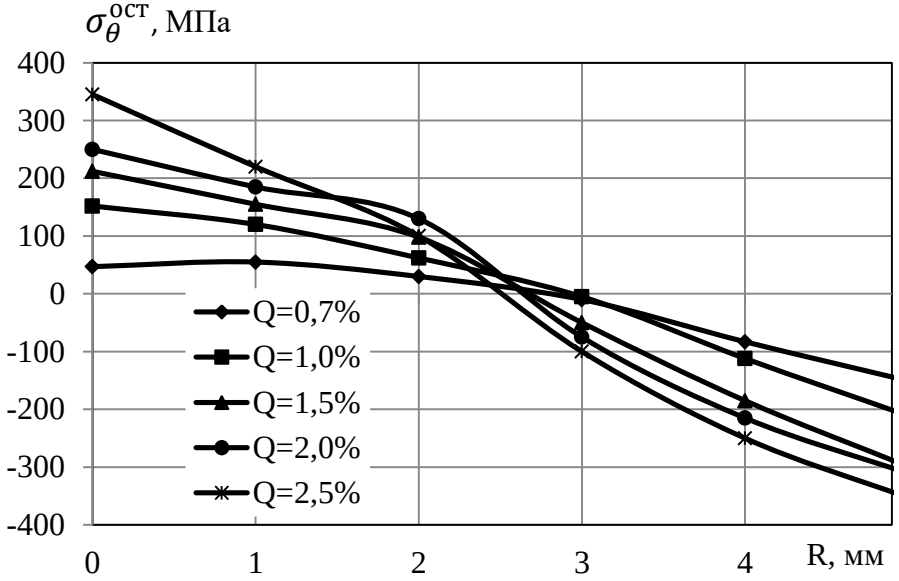


Рисунок 3.17 – Распределение тангенциальных остаточных напряжений по сечению цилиндрических деталей после ППД гладкими плитами

На рис. 3.17 показано распределение тангенциальных остаточных напряжений по сечению цилиндрических деталей. Из графика следует, что при всех значениях Q тангенциальные остаточные напряжения распределяются по следующему закону: монотонно снижаются от центра к поверхности цилиндра и формируются в центральной зоне – растягивающих напряжений, а на поверхности – сжимающих напряжений. Сжимающие напряжения уменьшаются в направлении от зоны контакта к оси симметрии цилиндра, и по мере приближения к центру тела меняют свой знак, то есть становятся растягивающими. При малых значениях Q =

0,7 – 1%, растягивающие напряжения в центре небольшие (47–152 МПа). При больших значениях обжатия (Q = 2 – 2,5%) растягивающие напряжения увеличиваются и достигают значения 345 МПа, что составляет примерно 95% от $\sigma_т$.

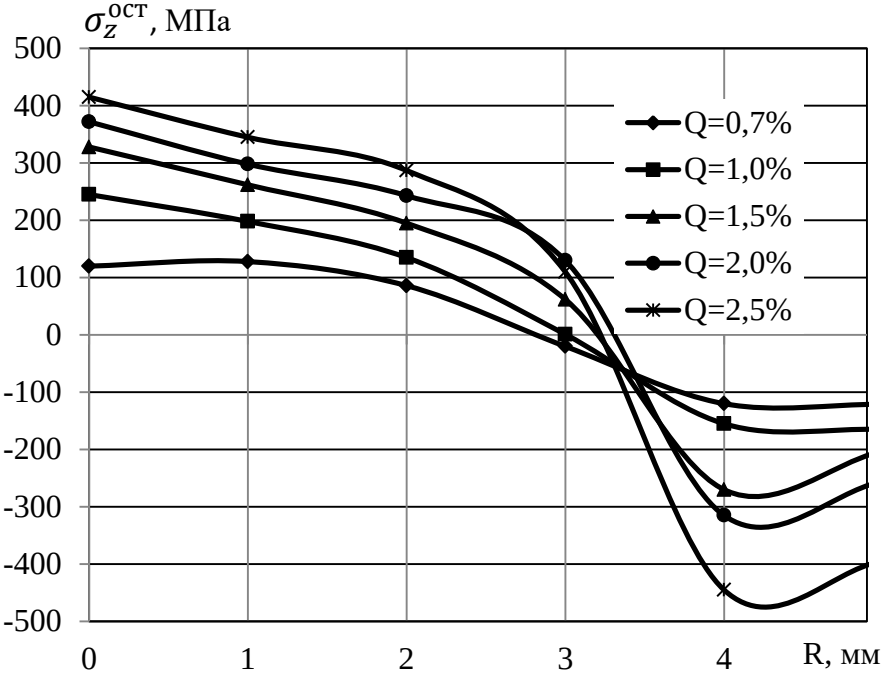


Рисунок 3.18 – Распределение осевых остаточных напряжений по сечению цилиндрических деталей после ППД гладкими плитами

На рис.3.18 показано распределение осевых остаточных напряжений по сечению выправленных цилиндрических деталей после ППД. Из графика видно, что при всех значениях Q осевые остаточные напряжения распределяются по аналогичному закону распределения $\sigma_\theta^{ост}$. При больших значениях обжатий Q = 2 – 2,5%, растягивающие осевые остаточные напряжения повышаются до 415 МПа, что составляет 1,15$\sigma_т$. Поэтому при больших значениях степени относительного обжатия в центральной зоне заготовки возможно разрушение материала.

На рисунке 3.19 показаны кривые распределения интенсивности остаточных напряжений по сечению цилиндрических деталей после ППД. Видно, что интенсивность остаточных напряжений монотонно увеличиваются от центра к периферии цилиндра. Это значит, что пластическое течение при поперечном сжатии эффективно происходит только в поверхностных слоях. В центральной зоне образцов интенсивность напряжения меньше, чем σ_T в 2,5 – 6,5 раз.

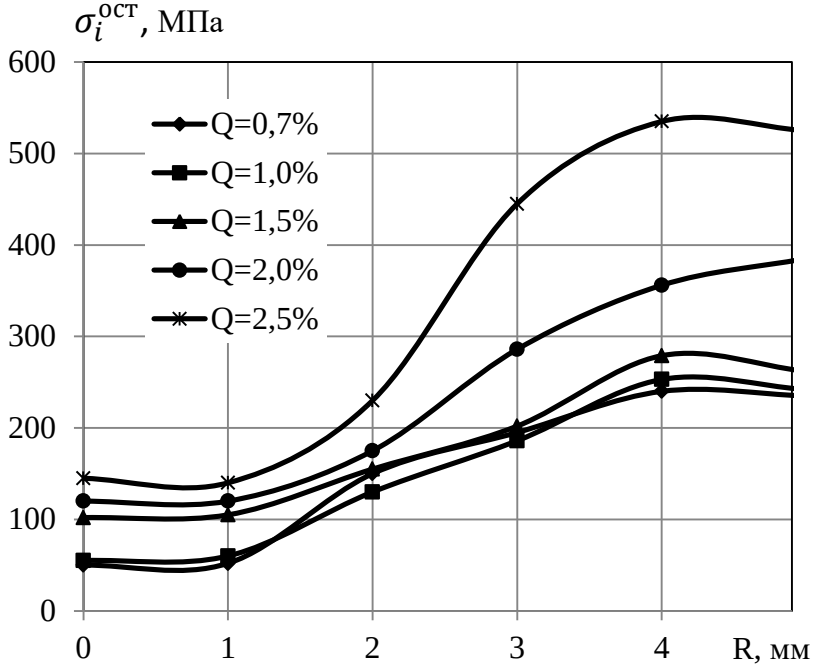


Рисунок 3.19 – Распределение интенсивности остаточных напряжений по сечению цилиндрических деталей

С помощью компьютерного программы ANSYS Workbench выполнено моделирование процесса ППД. Полученные результаты расчета остаточных напряжений подтверждают известной на практике факт, что при больших обжатиях в центральной зоне заготовки возможно разрыхление и разрушение материала. Следовательно, необходимо выбрать рациональный режим процесса ППД гладкими плитами для разработки технологии ППД валов на практике. Для получения рациональных растягивающих остаточных напряжений в центральной зоне цилиндра при сохранении благоприятных сжимающих напряжений на периферии необходимо выбирать оптимальные значения относительного обжатия величиной Q=1 – 1,5%.

При моделировании процесса ППД нежестких цилиндрических деталей гладкими плитами на ANSYS также можно определить глубину пластической деформации. На рис. 3.20 и рис. 3.21 показаны результаты определения зоны пластической деформации после ППД. Видно, что при поперечной обкатке со степенью относительного обжатия 2% получены радиус упругой деформации ρ = 1,35 мм и зону пластической деформации находится в пределе $1{,}35 \leq \rho \leq 5$ мм.

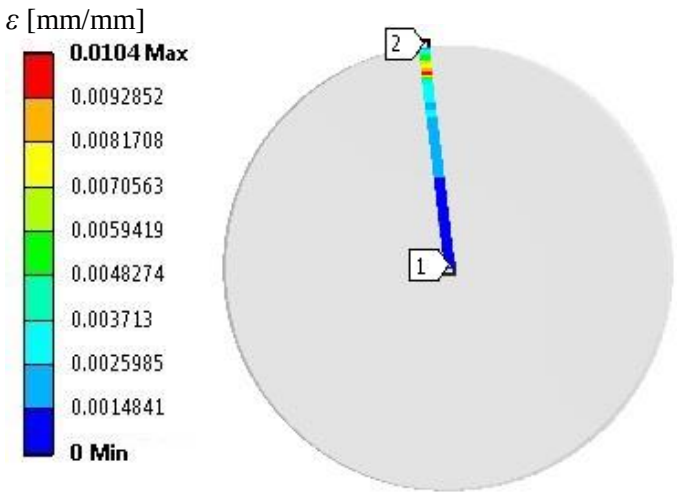


Рисунок 3.20 – Результат определения зоны пластической деформации после ППД гладкими плитами

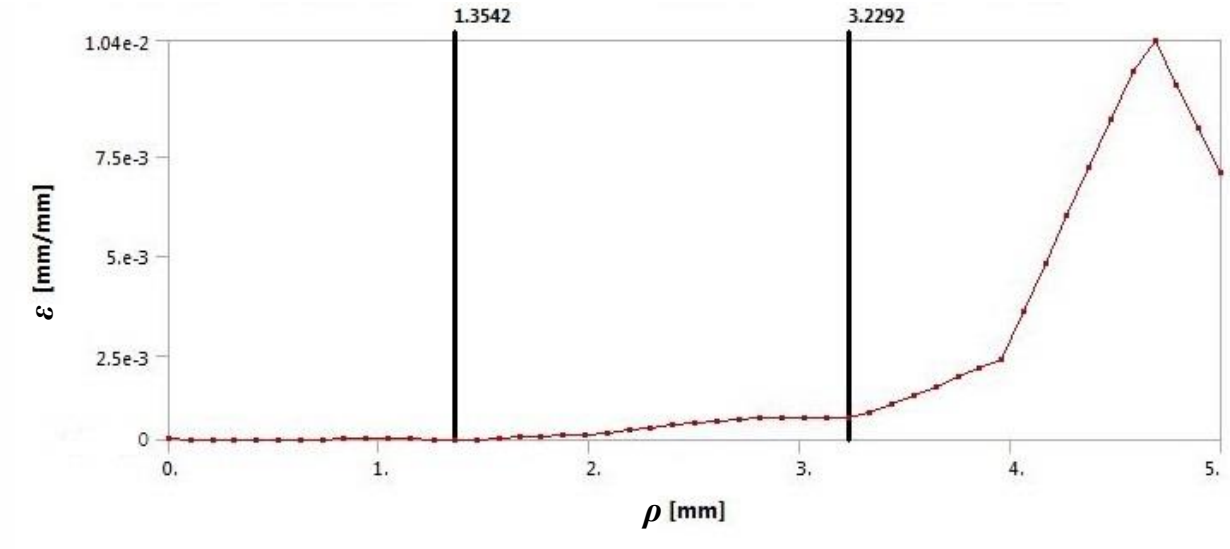


Рисунок 3.21 – График распределения пластической деформации при степени относительного обжатия Q = 2%.

Полученные результаты моделирования хорошо согласуются с аналитическим расчетом, основанным на законах теории упругопластического твердого тела (см. раздел 2.5). Из рисунка 3.21 видно, что в зоне ρ < 1,35 мм величина пластической деформации равна нулю, в зоне $1{,}35 \leq \rho \leq 3{,}23$ мм происходит незначительная деформация, поэтому зона пластической деформации цилиндрических деталей после ППД на самом деле находится в пределах $3{,}23 < \rho \leq 5$.

Зависимость глубины пластической деформации, формирующейся при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами, от степени относительного обжатия показана на рисунке 3.22. Чем больше величина степени относительного обжатия (до 4,3 %), тем большую величину имеют зоны пластические деформация, т.е. деталь имеет большую степень упрочнения. При степени относительного обжатия Q = 2,5 % глубина пластической деформации достигает около 1,8 мм.

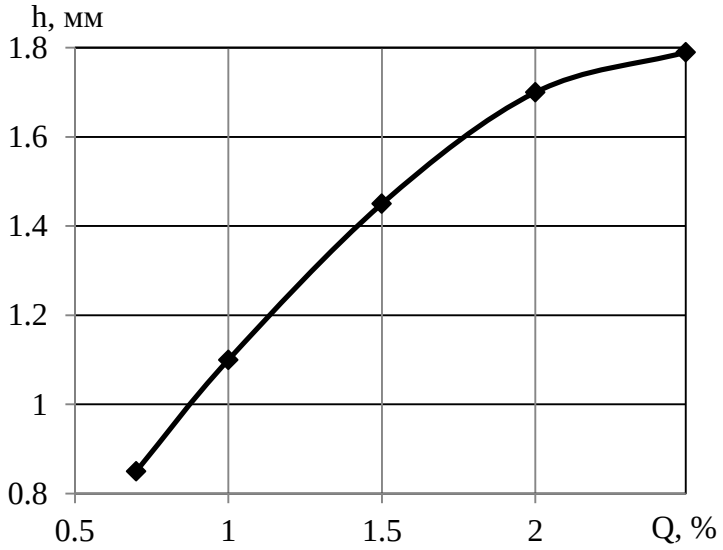


Рисунок 3.22 – Зависимость глубины пластической деформации от степени относительного обжатия

Влияние количества оборотов заготовки. При ППД гладкими плитами цилиндрические детали обычно подвергаются деформации за несколько оборотов. Поэтому при ППД этим способом необходимо исследовать зависимость напряженного состояния цилиндра от числа его оборотов. Для решения этой задачи выполнено моделирование процесса ППД цилиндров диаметром 10 мм, длиной 200 мм с максимальным прогибом 0,5 мм поперечной обкаткой гладкими плитами с относительным обжатием Q = 1,5 % при разных числах оборотов.

Рабочие напряжения в процессе поперечной обкатки незначительно изменяются после первого оборота цилиндра, а затем остаются постоянными (рис. 3.23). Наиболее интенсивное деформирование поверхностных слоев происходит за первую половину поворота цилиндра. На этом этапе пластическая деформация

проходит по всему периметру цилиндра с образованием максимальных рабочих напряжений.

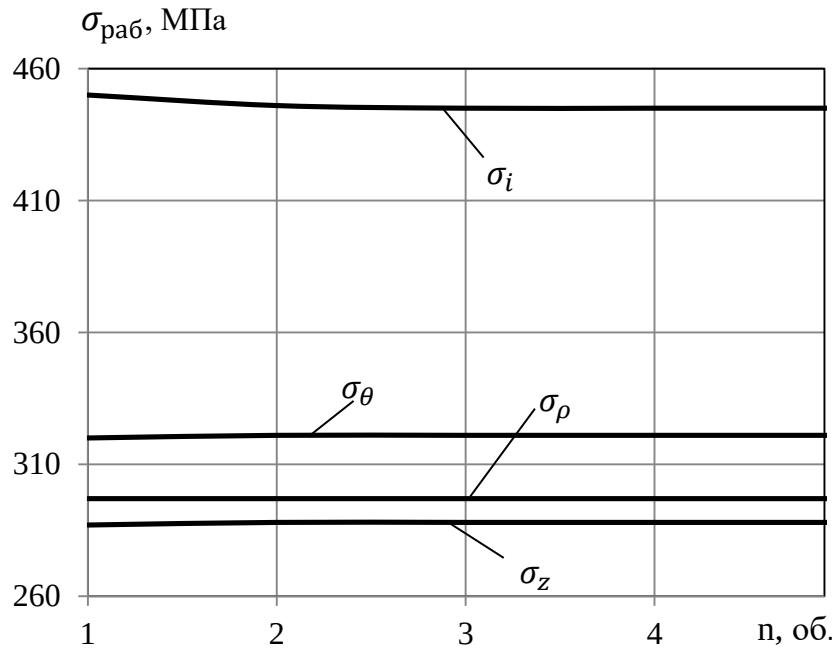


Рисунок 3.23 – Зависимость рабочих напряжений от числа оборотов заготовки

Результаты расчетов максимальных остаточных напряжений после моделирования процесса ППД гладкими плитами представлены в таблице 3.2. При разных числах оборотов заготовки остаточные напряжения отличаются друг от друга на 1-3%

Таблица 3.2 – Зависимость остаточных напряжений от числа оборотов заготовки

Число оборотов	σ_ρ, МПа		σ_θ, МПа		σ_z, МПа		σ_i, МПа	
	Мак.	Мин.	Мак.	Мин.	Мак.	Мин.	Мак.	Мин.
1	211	-5,7	212	-298	328	-270	279	102
2	214	-3,2	215	-300	330	-275	280	105
4	215	-2,8	214	-301	330	-274	280	100

Таким образом, установлено, что влияние числа оборотов заготовки на напряженное состояние незначительно. Это можно объяснить следующим образом. За первую половину оборота заготовки металл у поверхности цилиндра повергается пластической деформации, то есть происходит наклеп с повышением упругих свойств металла. Дальше при неизмененном натяге цилиндр упруго деформируется, поэтому после полной разгрузке не наблюдается значительного изменения пластической деформации и остаточных напряжений в цилиндре.

3.4 Влияние характеристики жесткости и материала заготовки на изменение геометрической формы деталей

Рассмотрим некоторые результаты численного расчета по определению влияния параметров процесса ППД поперечной обкаткой гладкими плитами на геометрическую форму деталей, которая характеризуется остаточным прогибом.

Влияние физико-механических свойств материала. Пластическая деформация металла зависит от его механических свойств, следовательно, и режимы процесса ППД поперечной обкаткой гладкими плитами, должны быть получены с учётом механических характеристик. Были выполнены расчеты по определению влияния предела текучести материала $\sigma_т$ на качество выправленных деталей, которое оценивали по величине максимального остаточного прогиба. Было выполнено моделирование процесса ППД гладкими плитами цилиндра диаметром 10 мм, длиной 200 мм с максимальным исходным прогибом 0,5 мм при разных значениях предела текучести.

Исследуя способность к деформирующему восстановлению деталей из разных марок сталей было получено, что при увеличении предела текучести материала способность изделия к восстановлению первоначальной формы увеличивается при одинаковых режимах ППД (рис. 3.24). Из графика на рисунке 3.24 следует, что использование режимов ППД, подобранных для стали 45 ($\sigma_т$=360 МПа), для других материалов, даёт отрицательный эффект (остаточный прогиб не равен нулю после ППД).

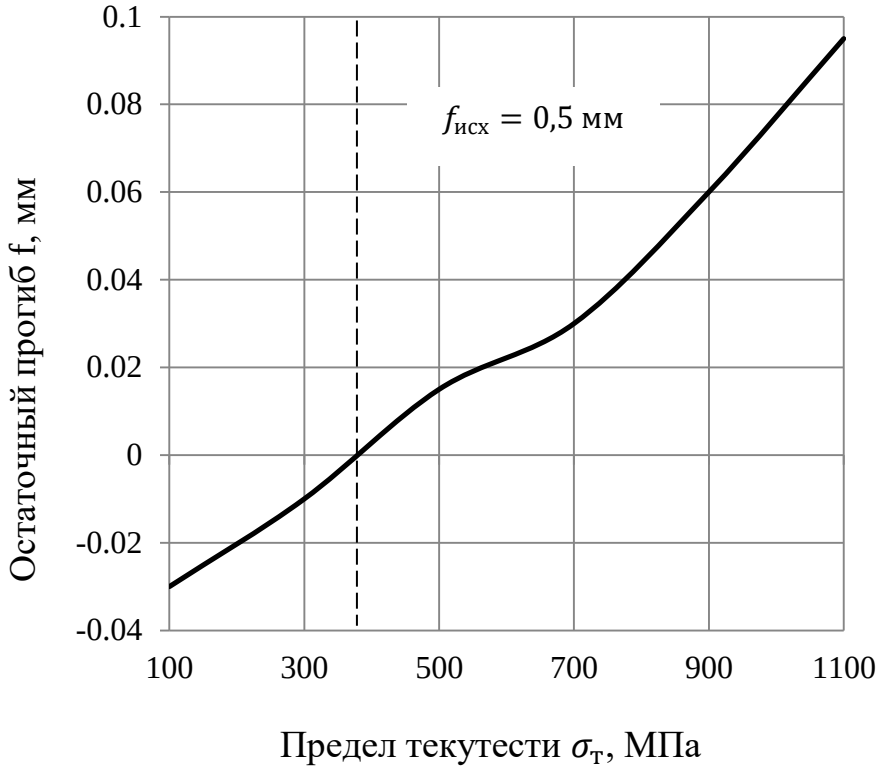


Рисунок 3.24 – Зависимость остаточного прогиба от предела текучести

(при D = 10 мм, L =200 мм, ξ=5,4; Q = 1,5%)

Результаты моделирования показали, что изменение диаметра цилиндра после ППД зависит от предела текучести $\sigma_т$ (рис. 3.25). Чем больше предел текучести стали, тем меньше происходит изменение диаметра цилиндра после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами. Для титанового сплава с большим значением $\sigma_т$ = 930 МПа изменение диаметра незначительно ΔD = 8 мкм (при Q = 1,5%). Предел текучести устанавливает границу между упругой и упругопластической зоной деформирования. Чем больше предел текучести, тем больше заготовка может претерпевать упругую деформацию и тем меньше остаточная деформация. При одинаковом пределе текучести, меньшее изменение диаметра получается у менее упругого материала – алюминиевого сплава (E = 71 ГПа), чем у медного сплава (E = 110 ГПа).

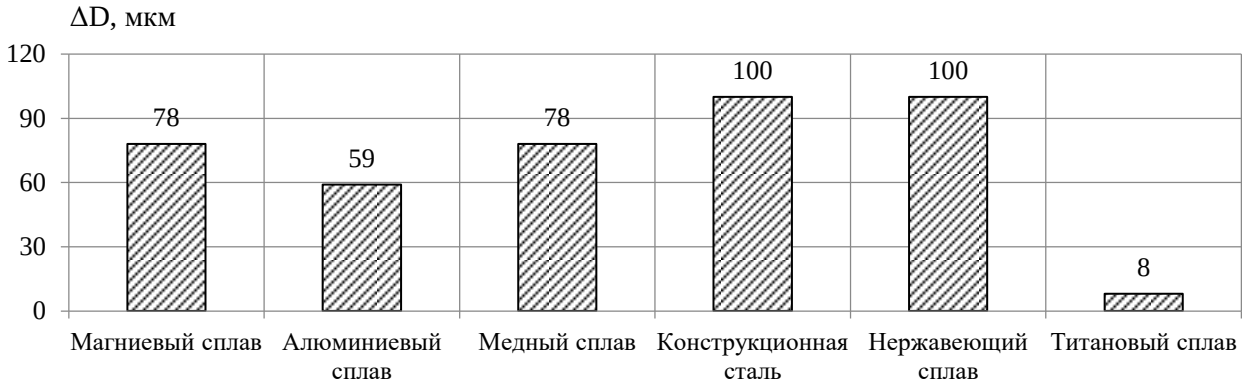


Рисунок 3.25 – Зависимость изменения диаметра цилиндрических деталей после ППД от механических свойств материала (при Q = 1,5%)

Влияние характеристики жесткости заготовки на остаточный прогиб. Результаты ППД поперечной обкаткой гладкими плитами должны зависеть от геометрии изделия характеризующей понятие «жёсткость». Для оценки влияния жесткости заготовки на остаточный прогиб было выполнено моделирование процесса ППД гладкими плитами цилиндра из стали 45, диаметром 10 мм с максимальным исходным прогибом 0,5 мм с разными значениями жесткости заготовки. Выполненные расчёты подтвердили предварительный качественный анализ.

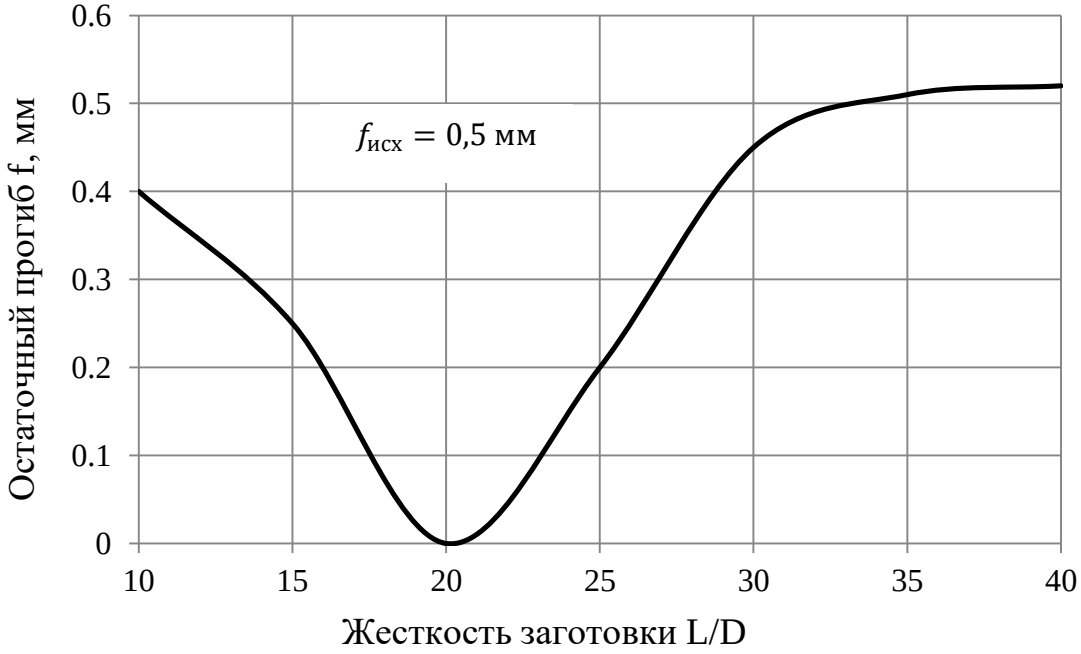


Рисунок 3.26 – Зависимость остаточного прогиба от характеристики жесткости заготовки L/D (при D = 10мм, ξ=5,4; Q = 1,5%)

Из рис. 3.26 видно, что остаточный прогиб в значительной мере зависит от геометрических параметров деталей при одинаковых режимах ППД. При L/D = 20 эффект ППД достигается в полной мере, а при L/D < 15 возникает обратное действие, то есть изделие искривляется. При L/D > 30 влияние на изменение начальной кривизны деталей незначительно. Поэтому, режимы ППД поперечной обкаткой гладкими плитами должны быть получены с учётом геометрии обрабатываемой детали.

Таким образом, в результате численных расчетов установлено, что для устранения остаточного прогиба имеются широкие технологические возможности. Причем оптимальные режимы ППД поперечной обкаткой гладкими плитами в значительной мере зависят от геометрических и физико-механических параметров обрабатываемых изделий. Режимы ППД выправленных деталей поперечной обкаткой гладкими плитами должны назначаться конкретно для каждого изделия. В этой связи весьма правомерно использование компьютерной программы для расчета оптимальных параметров технологического процесса правки длинномерных изделий.

Выводы по главе 3

1. Для численного определения напряжено-деформированного состояния и остаточных напряжений в выправленных цилиндрических деталях при ППД использован метод конечных элементов и программный комплекс ANSYS Workbench, позволяющие определить влияние основных параметров процесса ППД на качество деталей.

2. Результаты исследования остаточных напряжений показали, что после правки поперечным изгибом формируются неравновесные напряжения по всему объему заготовки, поэтому с течением времени ее форма может снова исказиться. После поперечной обкатки гладкими плитами формируются равновесные остаточные напряжения, как по длине, так и по поперечному сечению заготовки. Это

положительно сказывается на стабильности формы цилиндрических деталей малой жесткости.

3. Результаты расчетов показали, что остаточные напряжения зависят от величины относительного обжатия при поперечной обкатке. Получено рациональное значение относительного обжатия Q находится в пределах 0,7 – 2,5%, которое обеспечивает полученное необходимое качество выправленных деталей машин.

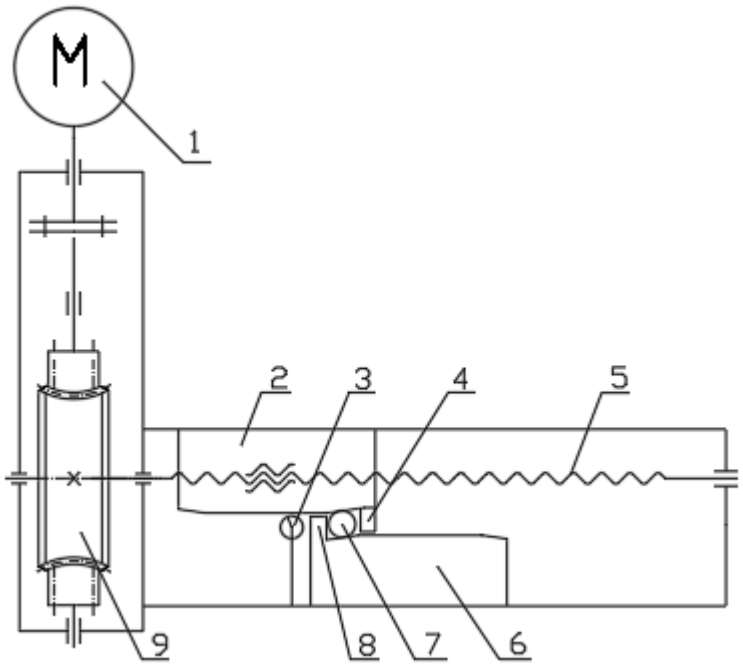
4. По результатам моделирования установлено влияние физико-механических свойств материала на напряженное состояние цилиндрических деталей. Рабочие напряжения в большой степени зависят от предела текучести металла. Повышение предела текучести ($\sigma_т$) и модуля упругости (E) способствует формированию остаточных напряжений с большими величинами. Влияние числа оборотов заготовки на напряженное состояние незначительно. Это необходимо учитывать при проектировании и изготовлении плит, от геометрии которых зависит производительность процесса ППД и металлоёмкость изделия.

5. Результаты численных расчетов показали, что для ППД выправленных цилиндрических деталей малой жёсткости имеются широкие технологические возможности. Причем оптимальные режимы ППД поперечной обкаткой гладкими плитами в значительной мере зависят от геометрических параметров и физико-механических свойств обрабатываемых изделий. Режимы ППД выправленных деталей поперечной обкаткой гладкими плитами должны назначаться конкретно для каждого изделия. В этой связи весьма правомерно использование компьютерной программы для расчета оптимальных параметров технологического процесса ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ППД

4.1 Проектирование и изготовление технологического оснащения

Работа правильно-обкатного станка представлена на рис. 4.1: вращение от вала электродвигателя 1 передается через червячный редуктор 9, на рабочий винт 5. Использование резьбового отверстия в подвижной плите 2, вращение винта 5 преобразуется в поступательное движение плиты 2. Плита 2 перемещается влево на величину общего прогиба, измеренный индикатором 3 (т.е. реализуется перегиб заготовки, необходимый для ее выправления).



1 – электродвигатель, 2 – подвижная плита, 3 – индикатор, 4 – выступ верхней плиты, 5 – рабочий винт, 6 – неподвижная плита, 7 – обрабатываемая деталь, 8 – упоры нижней плиты, 9 – червячный редуктор.

Рисунок 4.1 – Кинематическая схема правильно-обкатного станка

Далее верхняя плита перемещается вправо (разгрузка), заготовка принимает прямолинейную форму. После этого верхняя плита перемещается вправо и реали-

зует поперечную обкатку детали 7. Величина абсолютного обжатия изменяется путем подъема вверх или вниз неподвижной плиты 6. Обратное движение подвижной плиты 6 осуществляется за счет реверсирования вращения электродвигателя 1. Кинематическая схема устройства в условиях серийного производства представлена в разделе 5.4.

Конструкция правильно-обкатного станка для ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами, представленная на рис. 4.2. Правильно-обкатный станок состоит из следующих основных узлов: 1 – электродвигатель; 2 – подвижная плита; 3 – станина, предназначенная для закрепления и одновременного взаимодействия всех элементов в процессе работы; 4 – выступ верхней плиты, предназначенный для выполнения процесса правки поперечным изгибом; 5 – винт, для выполнения поступательного движения подвижной плиты 2; 6 – неподвижная плита; 7 – заготовка; 8 – упор, закрепленный с неподвижной плиты 6 для выправленной заготовки 7 поперечным изгибом; 9 – червячный редуктор; 10 – болты для закрепления неподвижной плиты 6 к станине 3 над подкладками 11; 11 – подкладки для регулирования величины абсолютного обжатия; 12 – ящик для размещения готовых изделий.

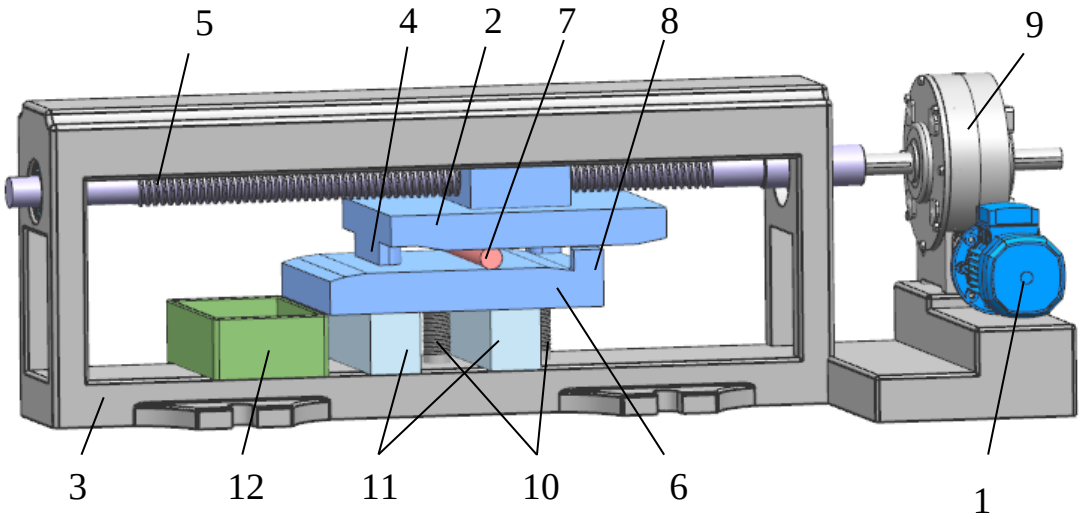
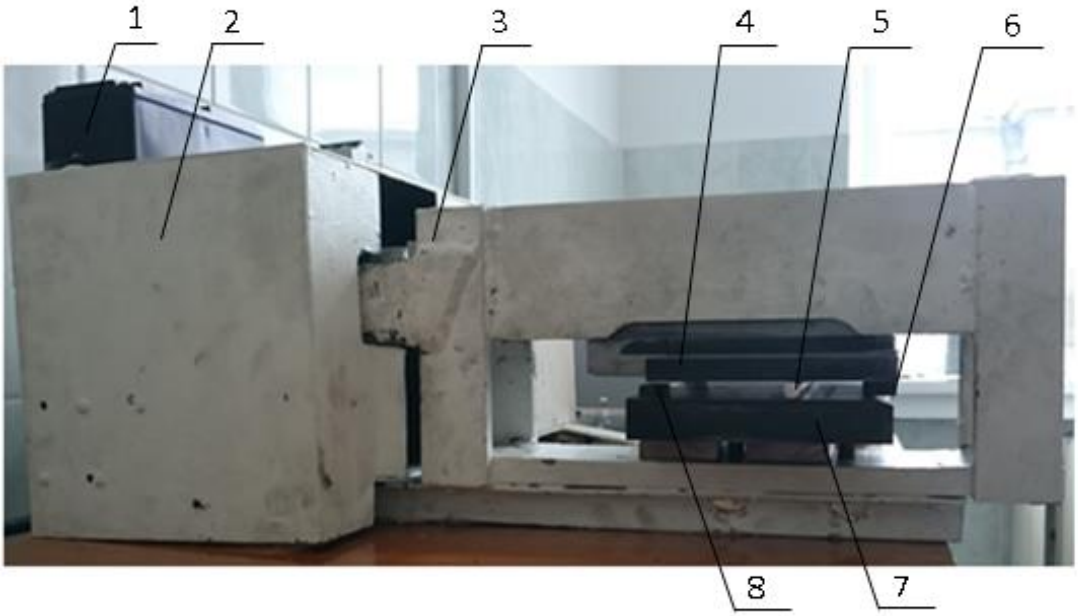


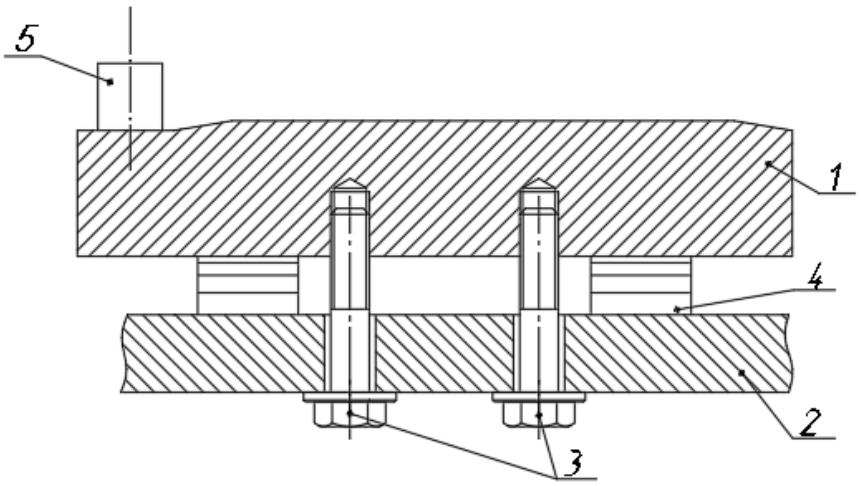
Рисунок 4.2 – Правильно-обкатный станок для ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен правильно-обкатный станок для ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами (рис. 4.3). Привод станка (мотор и червячный редуктор) находится под защитным кожухом.



1 – переключатель, 2 – привод станка (под защитным кожухом),
3 – станина, 4 – подвижная плита, 5 – обрабатываемая деталь,
6 – выступ верхней плиты, 7 – неподвижная плита, 8 – упоры нижней плиты.

Рисунок 4.3 – Экспериментальный правильно-обкатный станок



1 – неподвижная плита, 2 – станина, 3 – болты, 4 – подкладки, 5 – упор

Рисунок 4.4 – Схема установки неподвижной плиты

На рисунке 4.4 показана схема установки нижней неподвижной плиты на станине. Плита 1 устанавливается над подкладками 4 и закрепляется к станине 2 с помощью болтов 3. Расстояние между плитами регулируется путем изменения высоты неподвижной плиты 1 относительно станины 2 с помощью подкладок 4.

Плиты изготовляют из инструментальной стали У12А. Плиты подвергают закалке с последующим отпуском при 240-270° с выдержкой 30 - 40 мин. Достигаемая твёрдость плит после термической обработки составляет HRC = 56-60. Поверхность плиты была отшлифована до шероховатости Ra = 0,1 мкм [67, 72].

Объекты и параметры экспериментальных исследований. В качестве исследуемых деталей использованы цилиндрические образцы диаметром 10, длиной 200 мм с максимальным прогибом 0,5 мм из некоторых материалов: конструкционная углеродистая сталь Ст45, Ст20, алюминиевый сплав АК4-1, АМГ-3. Длина всех исследуемых деталей выбрана с учетом ширины гладких плит – 205 мм.

Исходная шероховатость поверхности образцов Ra находилась в диапазоне от 1,25 до 5,0 мкм. Механические свойства исследуемых материалов приведены в таблице 4.1. Место контакта между заготовкой и плитами нагревается незначительно, поэтому охлаждение при поперечной обкатке не требуется.

Таблица 4.1 –Физико-механические свойства исследуемых материалов

Материал	Физико-механические свойства			
	Е, ГПа	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	НВ, МПа (не более)
Сталь 45	200	360	600	174 – 217
Сталь 20	212	280	430	131 – 163
АК4-1	72	280	380	109 – 117
АМГ-3	71	120	230	45

Основными параметрами экспериментов, влияющими на качество деталей после ППД (геометрическая точность деталей, качество поверхностного слоя), являются коэффициент изгиба и величина абсолютного обжатия [16, 19, 33]. Качество деталей после ППД оценивали показателями качества изделий: погрешность

отклонения от круглости и прямолинейности оси, остаточные напряжения, микротвердость (HV), шероховатость (Ra, Rz), микроструктура обработанной поверхности. Размерную стабильность деталей после ППД оценивали по параметру восстановления отклонения от прямолинейности оси цилиндра в течение 360 суток в термоконстантном шкафу при температуре 20°С.

Параметры процесса ППД выправленных деталей. Процесс правки изгибом осуществляется путем упругопластического изгиба на величину общего прогиба в направлении, противоположном исходному прогибу. Зависимость между исходным ($f_{\text{исх}}$) и общим ($f_{\text{общ}}$) прогибом можно представить в виде:

$$f_{\text{общ}} = \xi \cdot f_{\text{исх}}, \tag{4.1}$$

где ξ – коэффициент изгиба.

Из материалов работы [30, 33] выбраны коэффициенты изгиба в пределах 5,3 – 5,5 и величины абсолютных обжатий, которые составляют не более 0,4 мм.

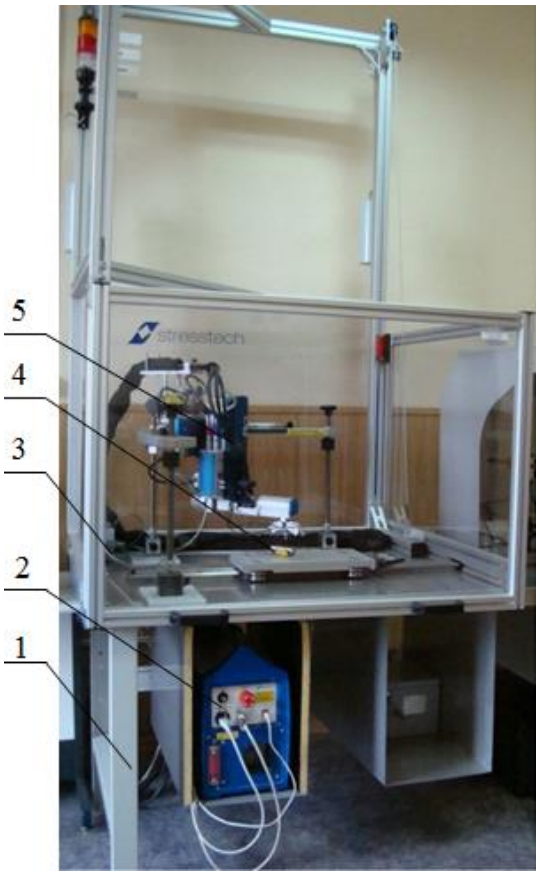
Каждый образец после правки поперечным изгибом, обкатан на правильно-обкатном станке с величиной абсолютного обжатия ΔН соответственно 0,07; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 мм. Эти величины абсолютного обжатия соответствуют степеням относительного обжатия (Q) 0,7; 1; 1,5; 2; 2,5% (см. формулу (2.45)). После правки поперечным изгибом, все детали подвергали обкатке за несколько полных оборотов.

4.2 Определение остаточных напряжений в деталях после ППД

После ППД образцов поперечной обкаткой гладкими плитами измеряли остаточные напряжения на рентгеновском анализаторе (дифрактометр) остаточных напряжений *Xstress 3000 G3*. Устройство состоит из основного блока *X3003*, гониометра *G3* и универсального программного обеспечения для управления оборудованием и обработки данных (рис. 4.5).

Xstress 3000 G3 измеряет остаточные напряжения и содержание остаточного аустенита с использованием рентгеновского излучения. Принцип измерения основан на законе Брэгга. Эта известная и проверенная временем технология рентгеновской дифракции идеально подходит для ферритных сталей и может приме-

ниться ко всем кристаллическим материалам, включая керамику. Разработанный специально для измерения остаточных напряжений, *Xstress 3000 G3* прост в использовании и настолько высокотехнологичен, что способен удовлетворить самого требовательного исследователя. Программное обеспечение предоставляет доступ ко всем настройкам и результатам измерения на любой стадии процесса измерения. Устройство пригодно как для работы в лаборатории, так и в полевых условиях. Прибор может быть легко установлен, демонтирован и перенесен одним человеком. Прибор автономен, для работы необходимо только внешнее электропитание. На подготовку прибора к работе с момента доставки прибора на место измерения требуется всего десять минут [65].



1 – основной стол,

2 – основной блок *X3003*,

3 – защитный экран,

4 – образец,

5 – гониометр *G3R*

Рисунок 4.5 – Дифрактометр *Xstress 3000 G3*

В дифрактометре реализован χ-модифицированный гониометр: вместо углов ψ, и в традиционном методе $sin^2\psi$, используются углы вращения χ. Все измерения остаточных напряжений проводились в режиме Modified χ (модифицированный χ), который является стандартным режимом измерений для большинства

деталей. Положение гониометра в режиме Modified χ показано на рисунке 4.6. На основе измерении остаточные напряжения определяются одним из стандартных способов обсчета пиков, предлагаемым программным обеспечением прибора.



1 – детектор,
2 – дугообразная направляющая по горизонтали,
3 – направляющие по вертикали,
4 – измерительная головка,
5 – коллиматор,
6 – образец,
7 – рабочий стол

Рисунок 4.6 – Положение гониометра в режиме Modified χ

Порядок выполнения измерения: Вначале закрепить образец на рабочем столе, передвинуть измерительную головку на середину цилиндра. Далее установить рентгеновский дифрактометр в автоматический режим. Потом записать результаты измерений на компьютере.

Результаты исследования остаточного напряжения на поверхности деталей. Остаточные напряжения на обработанной поверхности измеряли в четырех точках по окружности на поверхности каждого сечения (А-А, Б-Б, В-В) (рис. 4.7) и вычислили среднеарифметические значения.

В каждой точке получены остаточные напряжения в двух направлениях: вдоль оси – осевые остаточные напряжения σ_z^o и поперек оси – тангенциальные остаточные напряжения σ_θ^o. Результаты измерения остаточных напряжений после правки изгибом представлены в таблице 4.2, а среднеарифметические значения остаточных напряжений после поперечной обкатки гладкими плитами представлены в таблице 4.3.

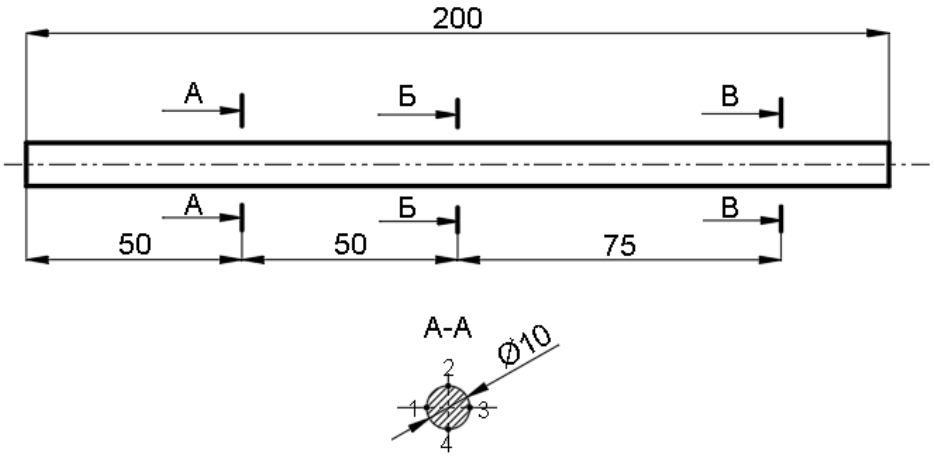


Рисунок 4.7 – Схема замеров остаточных напряжений

После правки поперечным изгибом формируются неравновесные напряжения по сечению и длине заготовки (см. таб. 4.2), поэтому с течением времени форма детали может снова исказиться. Для выравнивания неравновесных напряжённых состояний в нежестких цилиндрических деталях предлагается дополнительно обрабатывать заготовки способом поверхностного пластического деформирования, основанным на поперечной обкатке гладкими плитами.

Таблица 4.2. – Остаточные напряжения на поверхности деталей после правки поперечным изгибом

Точка	Остаточные напряжения, МПа					
	Сечение А-А		Сечение Б-Б		Сечение В-В	
	Вдоль (σ_z^o)	Поперёк (σ_θ^o)	Вдоль (σ_z^o)	Поперёк (σ_θ^o)	Вдоль (σ_z^o)	Поперёк (σ_θ^o)
1	-71	-2	-179	-9	-15	-1,5
2	-1	0	+2	+1	0	0
3	+75	3	+180	+8	+16	1,2
4	+2	0	-6	+1	0	0

Экспериментально установлено, что после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами получены равновесные остаточные напряжения на поверхности детали и в поверхностных слоях заготовки формируются остаточные напряжения –

сжатия (таб. 4.3). Сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях изделия повышают его износостойкость, прочность и другие эксплуатационные характеристики [12, 94]. Эти напряжения, суммируясь с напряжениями эксплуатационных нагрузок, смещают среднее напряжение цикла в сторону сжатия. Если учесть то, что, как и все конструкционные материалы, сталь 45 значительно лучше сопротивляется сжатию, чем растяжению, то сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое многократно повышают усталостную долговечность деталей. При ППД поперечной обкаткой с увеличением величины абсолютного обжатия остаточные напряжения сжатия увеличиваются. Большие остаточные напряжения распределены в тангенциальном направлении, они в среднем в 1,5-2 раза превышают осевые остаточные напряжения.

Таблица 4.3 – Остаточные напряжения на поверхности деталей после изгиба и ППД поперечной обкаткой гладкими плитами

Степень относительного обжатия (Q, %)	Остаточные напряжения, МПа					
	Сечение А-А		Сечение Б-Б		Сечение В-В	
	Вдоль (σ_z^o)	Поперёк (σ_θ^o)	Вдоль (σ_z^o)	Поперёк (σ_θ^o)	Вдоль (σ_z^o)	Поперёк (σ_θ^o)
0,7	-172	-263	-176	-263	-170	-261
1,0	-209	-280	-211	-279	-210	-281
1,5	-268	-297	-270	-298	-265	-298
2,0	-289	-348	-295	-351	-287	-350
2,5	-323	-375	-327	-374	-317	-372

Зависимость осевых и тангенциальных остаточных напряжений от величины абсолютного обжатия представлена на рис. 4.8. На графике показаны результаты определения остаточных напряжений по экспериментальным измерениям и компьютерному моделированию. Результаты экспериментов подтверждают полученные ранее выводы о положительном влиянии процесса ППД поперечной обкаткой на характер распределения остаточных напряжений.

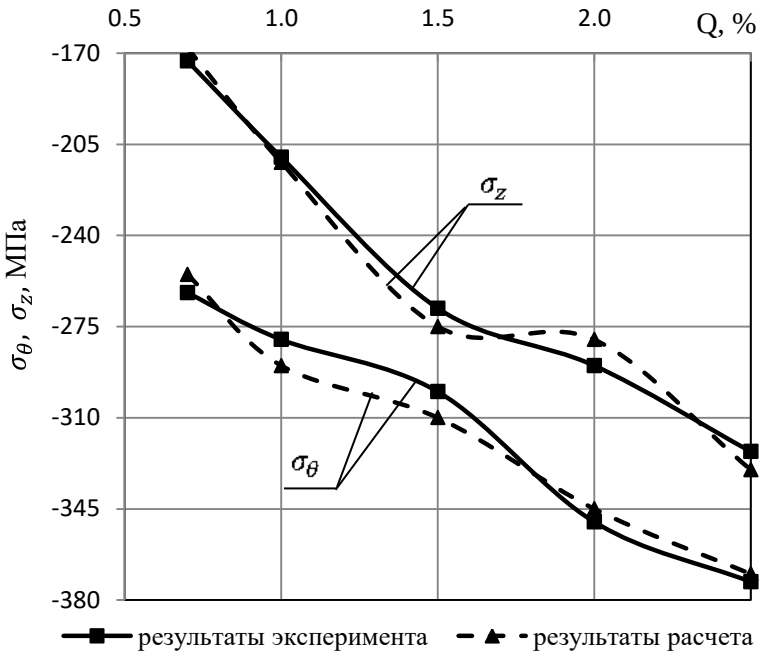


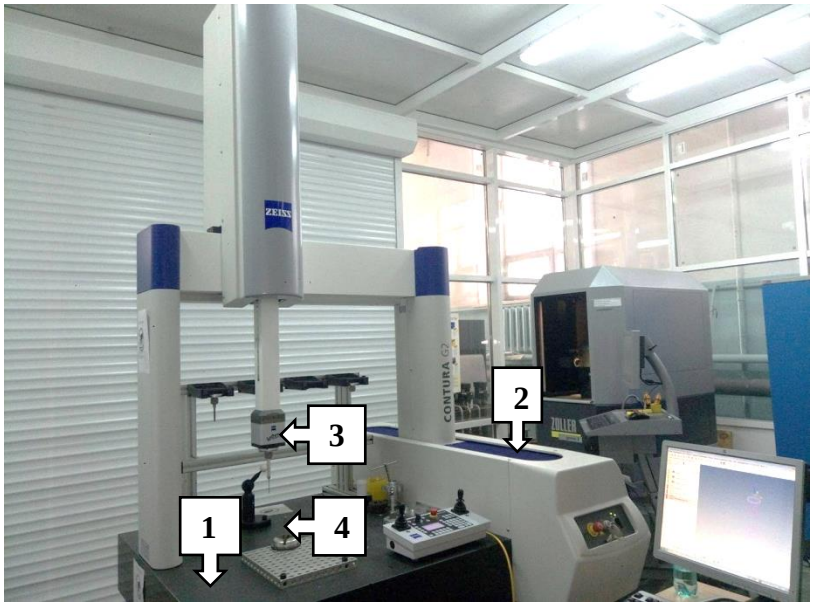
Рисунок 4.8 – Зависимость остаточных напряжений от степени относительного обжатия (Q)

Результаты определения остаточных напряжений, полученные экспериментально и расчетами в ANSYS, отличаются не более 6%. Следовательно, результаты определения остаточных напряжений в конечно-элементной модели достоверны для оценки напряженного состояния деталей из стали 45 при ППД поперечной обкаткой гладкими плитами. Кроме этого, использование конечно-элементного моделирования позволяет получить более полную информацию об остаточных напряжениях в любой точке деталей (по сечению и длине деталей), что дает возможность прогнозировать напряженно-деформированное состояние деталей без длительных и дорогостоящих испытаний на практике.

4.3 Определение геометрической точности деталей после ППД

Основной контроль геометрической точности деталей типа валов и осей заключается в проверке двух параметров – диаметральных размеров и геометрической прямолинейности оси. Для измерения диаметра, отклонения от круглости и отклонения от прямолинейности образцов использована портальная координатно-

измерительная машина (КИМ) Carl Zeiss Contura G2 Aktiv (рис. 4.9). Чтобы повысить точность и производительность в процессе измерения необходимо выбрать оптимальную стратегию измерения детали. Для измерения диаметральных размеров оптимальной траекторией движения измерительной головки является кривая, показанная на рисунке 4.10, а). Траектория движения измерительной головки для измерения геометрической прямолинейности оси показаны на рисунке 4.10, б). В результате контроля измеряется несколько сотен или тысяч точек. С увеличением количества контролируемых точек повышается время контроля, поэтому выбрано 1536 точек для измерения диаметральных размеров и 195 точек для измерения геометрической прямолинейности оси с точностью 1 мкм.



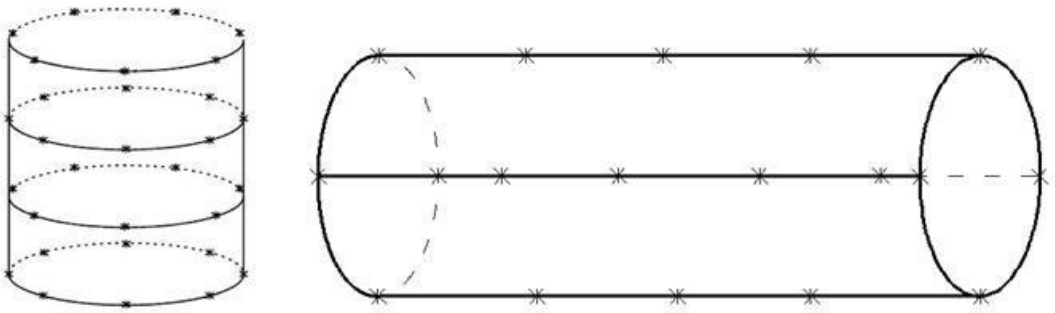
1 – стол,

2 – блок управления,

3 – измерительная головка,

4 – образец

Рисунок 4.9 – Портальная координатно-измерительная машина (КИМ) CONTURA G2



а) б)

Рисунок 4.10 – Траектория движения измерительной головки:

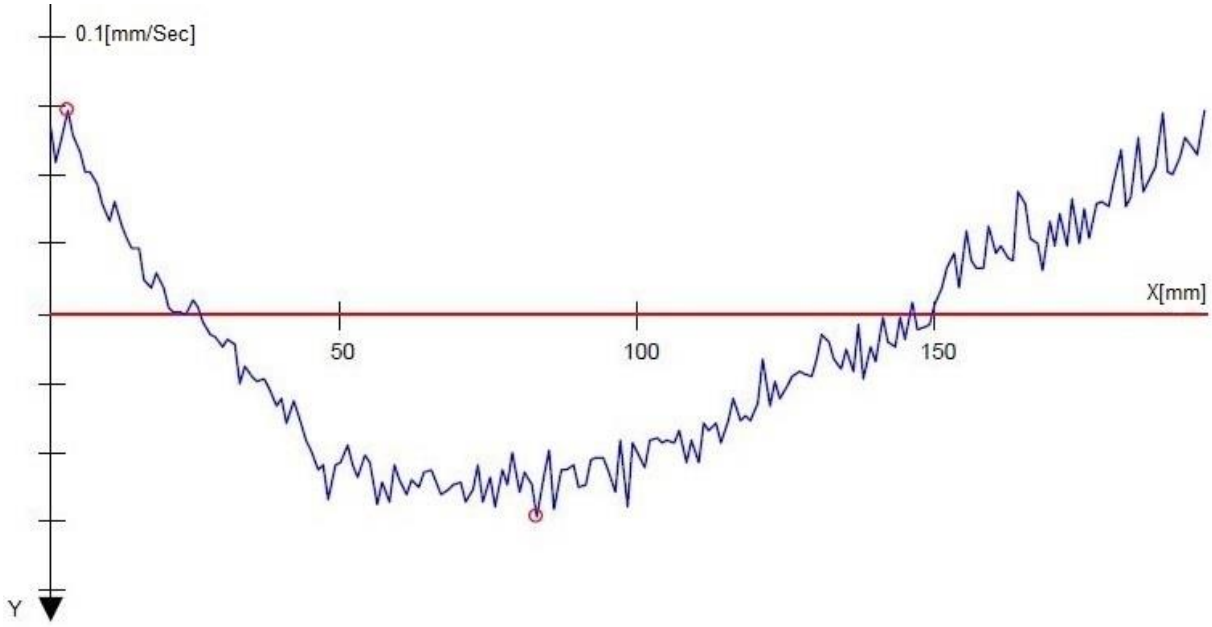
а) – для измерения диаметральных размеров;

б) – для измерения геометрической прямолинейности оси

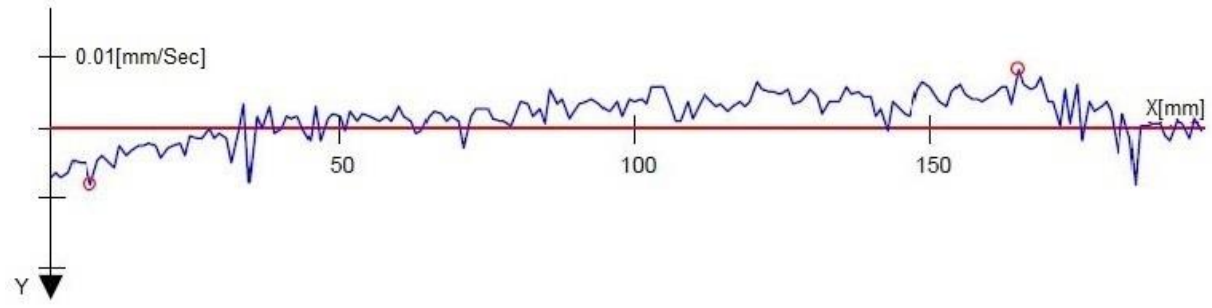
Для выполнения измерения необходимо разработать оптимальную стратегию измерения детали, написать программу измерения, а затем вывести результаты измерения на компьютер и проанализировать полученные результаты.

Результаты измерения представлены в виде профилограмм поперечных сечений, значений отклонения от круглости и отклонения от прямолинейности.

Профилограммы по длине цилиндра до и после обкатки представлены на рисунке 4.11, а профилограммы по поперечному сечению цилиндра – на рисунке 4.12. Даже без расчетов визуально видно улучшение круглости и прямолинейности деталей после ППД гладкими плитами.



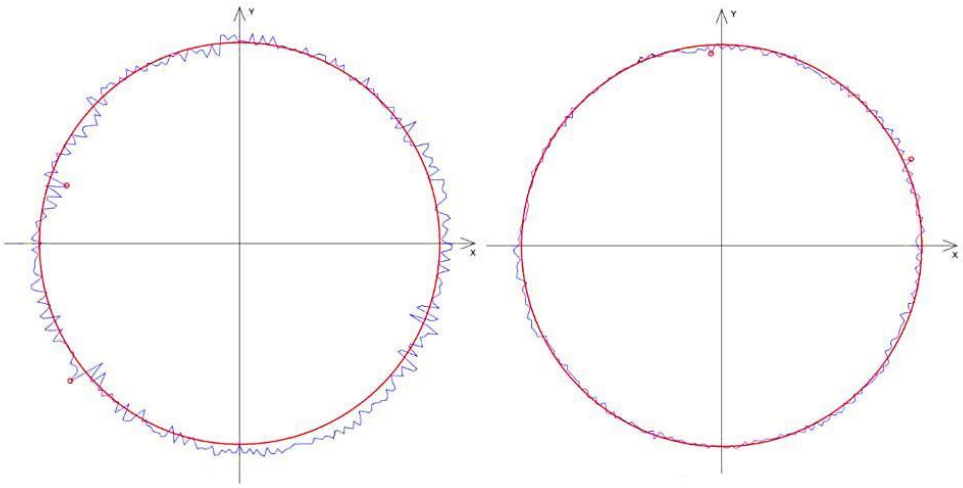
а)



б)

Рисунок 4.11 – Профилограммы по длине цилиндра:

а) до правки, б) после ППД гладкими плитами (Q = 1,5%)



а) б)

Рисунок 4.12 – Профилограммы (круглограмма) поперечных сечений:
а) до правки, б) после ППД гладкими плитами (Q =1,5%)

Результаты измерения геометрической точности деталей. Результаты измерений изменения диаметра (ΔD) цилиндрических образцов из стали 45 зависящие от степени относительного обжатия (Q), представлены на рис. 4.13. Величина изменения диаметра детали находится в диапазоне от 26-30% от величины абсолютного обжатия. Это связано с упругой деформацией заготовки и деформацией деталей станка. С увеличением степени обжатия, величина изменения диаметра деталей возрастает почти линейно (см. рис. 4.13).

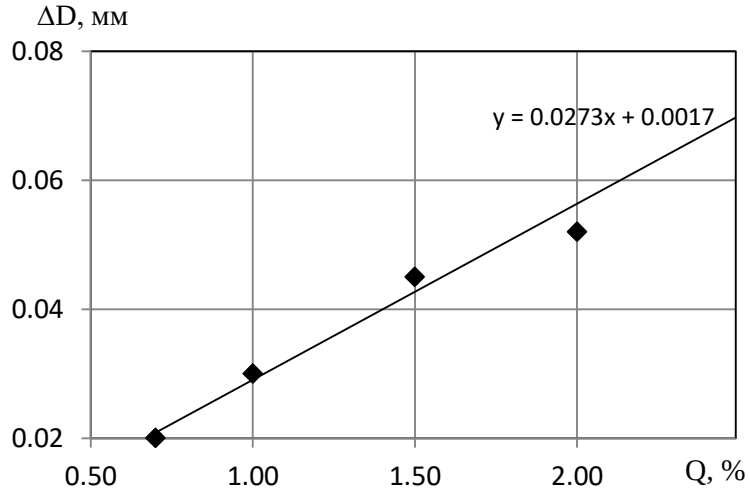


Рисунок 4.13 – Зависимость изменения диаметра от степени относительного обжатия (Q)

Способ ППД поперечной обкаткой гладкими плитами приводит к изменению диаметрального размера, поэтому для обеспечения заданной точности деталей необходимо правильно назначать величину абсолютного обжатия. Так, при выправлении деталей (D = 10 мм, L = 200 мм, $f_{\text{исх}}^{max} = 0{,}5$ мм, Q = 1,5 %) их диаметральные размеры уменьшается на 0,4%. Поэтому данный способ ППД можно рекомендовать при изготовлении деталей или при ремонте готовых изделий с невысоким квалитетом точности, например, для некоторых деталей сельскохозяйственной или горной техники. Для нежестких деталей целесообразную вводить в технологический процесс обкатки гладкими плитами, которая обеспечивает прямолинейность и качество поверхностного слоя деталей машин.

Результаты измерений изменения диаметра деталей из некоторых металлов приведены на рисунке 4.14. Уменьшения диаметра деталей практически зависит от величины относительного обжатия и изменяется линейно. На этом графике показано, что чем больше прочность материала, тем в меньшей степени происходит изменение диаметра деталей.

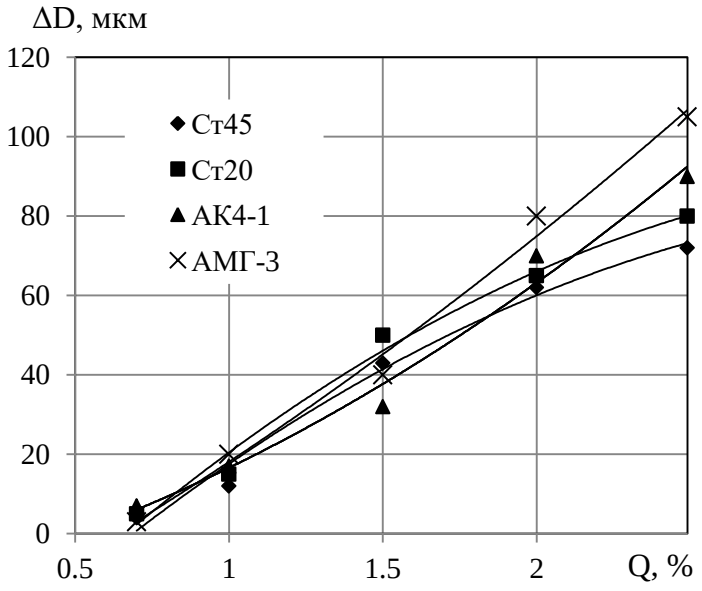


Рисунок 4.14 – Зависимость изменения диаметра деталей от степени относительного обжатия (Q)

Число оборотов заготовки *n* при ППД гладкими плитами незначительно влияет на изменение диаметра деталей (рисунок 4.15). При *n*>5 не происходит дополнительного изменения диаметрального размера.

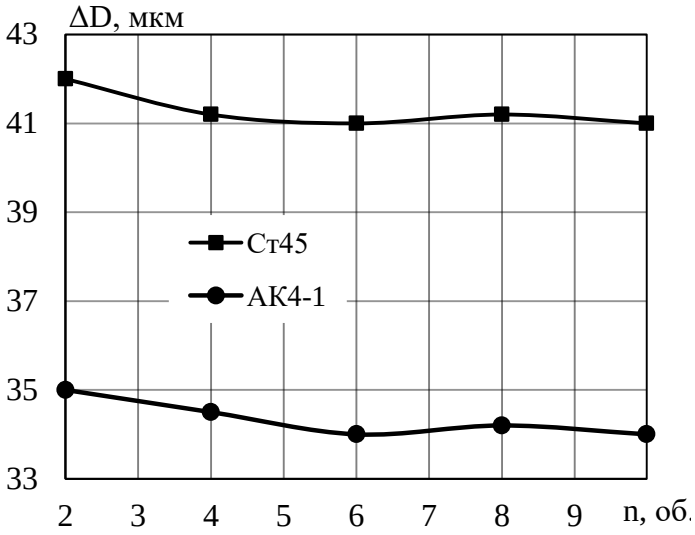


Рисунок 4.15 – Влияние числа оборотов детали на изменение диаметрального размера (ΔН =0,15 мм)

Когда цилиндрическая заготовка подвергается радиальному сжатию, форма поперечного сечения искажается, но при последующем вращении заготовки под нагрузкой контур выравнивается по поперечному сечению.

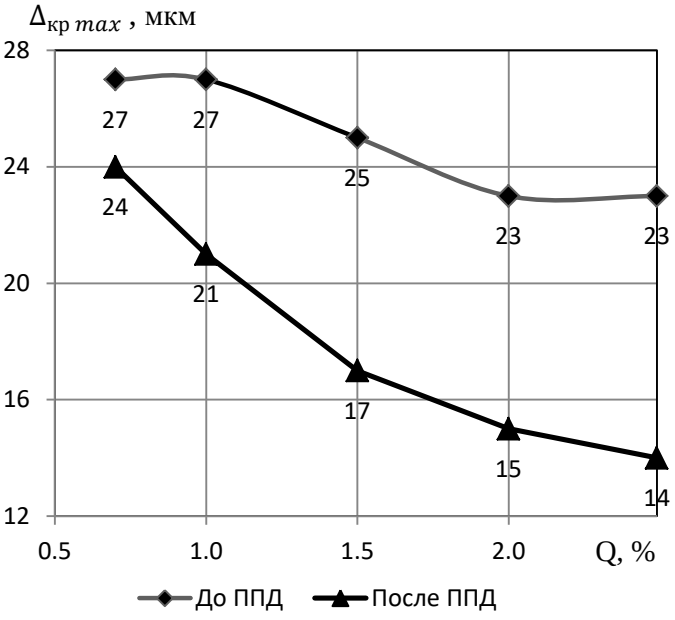


Рисунок 4.16 – Зависимость отклонения от круглости ($\Delta_{кр\,max}$) от степени относительного обжатия (Q)

На рисунке 4.16 показано максимальное отклонение от круглости образцов из стали 45 до и после ППД. Начальное отклонение партии деталей составило 23 – 27 мкм, что соответствует $11^{-ой}$ степени точности. После поперечной обкатки гладкими плитами точность формы деталей из стали 45 повышается на 1-2 степень точности.

При увеличении числа оборотов заготовки тоже происходит уменьшение отклонения от круглости деталей после обкатки гладкими плитами (рис. 4.17). Для образцов из стали 45 отклонение от круглости деталей уменьшается на 39% после поперечной обкатки за два оборота и в дальнейшем уменьшается до 56% после обкатки за 10 оборотов детали. Для образцов из мягкого металла АК4-1 отклонение от круглости деталей уменьшается на 68% после обкатки за два оборота и в дальнейшем происходит незначительно снижение.

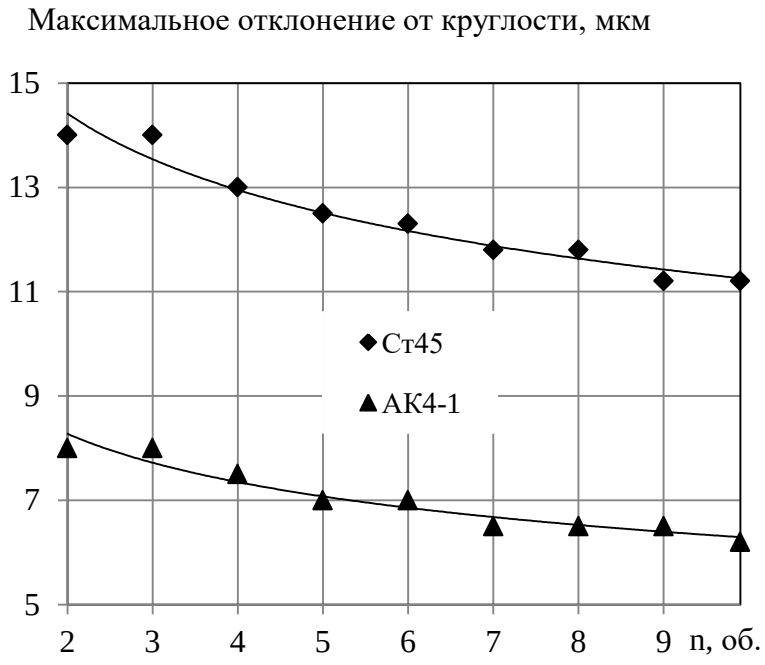


Рисунок 4.17 – Влияние числа оборотов заготовки на отклонение от круглости (при Q = 2 %).

Основным показателем качества правки является отклонение от прямолинейности осевой линии заготовки. На рисунке 4.18 показано максимальное отклонение оси от прямолинейности деталей из стали 45 после правки изгибом и поперечной обкаткой. Согласно экспериментальным данным, после правки изгибом полученные максимальные остаточные прогибы находятся в диапазоне 18-21 мкм. После последующего процесса обкатки гладкими плитами максимальный остаточный прогиб составляет около 4 мкм (при Q = 2,5%). При увеличении величины абсолютного обжатия остаточные прогибы уменьшаются.

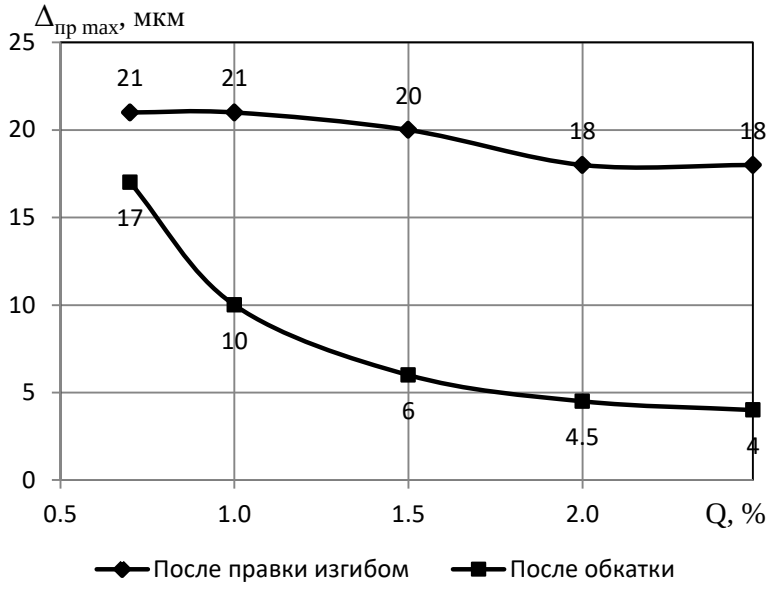
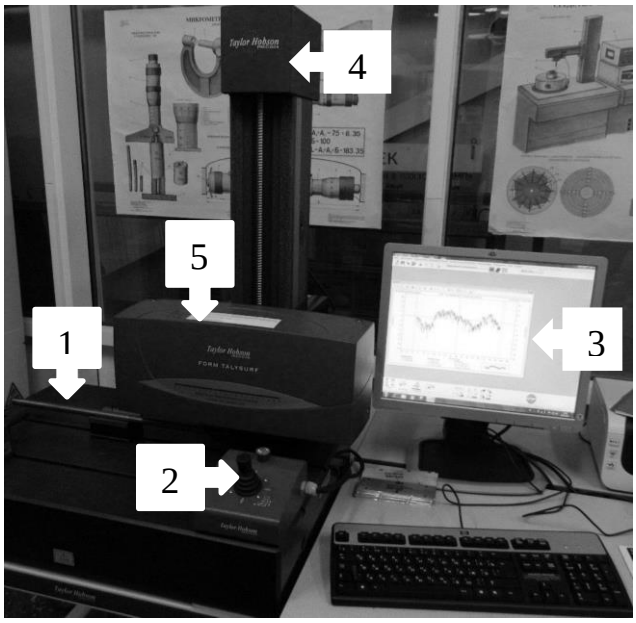


Рисунок 4.18 – Зависимость отклонения от прямолинейности ($\Delta_{пр\ max}$) от степени относительного обжатия (Q)

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. На уменьшение диаметра деталей и отклонение от прямолинейности оси после обкатки гладкими плитами больше всего влияет степень относительного обжатия. Число оборотов заготовки почти не влияет на изменение диаметра, но при его увеличении значительно снижается отклонение от круглости деталей.

4.4 Определение шероховатости поверхности деталей до и после ППД

После ППД заготовок поперечной обкаткой гладкими плитами измеряли параметры шероховатости и волнистости на профилометре *Form Talysurf i200* производства фирмы *Taylor Hobson* с компьютерным управлением (рис. 4.19). Профилометр, подключен к стандартному персональному компьютеру. Для измерения шероховатости цилиндрические детали закрепляли на специальной призме, установленной на плите. Далее перемещали измерительную головку по поверхности детали. Каждое измерение на экране монитора отображалось профилограммой, с высотными характеристиками микропрофиля. Результаты замеров обрабатывались специализированной компьютерной программой.



1 – образец,

2 – ручное управление измерительной головкой,

3 – компьютер,

4 – направление по вертикали,

5 – измерительная головка.

Рисунок 4.19 – Профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200

Результаты исследования параметров шероховатости и волнистости поверхности изделий. Исходная и полученная шероховатость каждого образца измерена в трех разных участках по окружности. Результаты средних значений по трем полученным измерениям шероховатости Ст45 приведены на рис. 4.20. Установлено, что при увеличении степени относительного обжатия шероховатость поверхности деталей уменьшается.

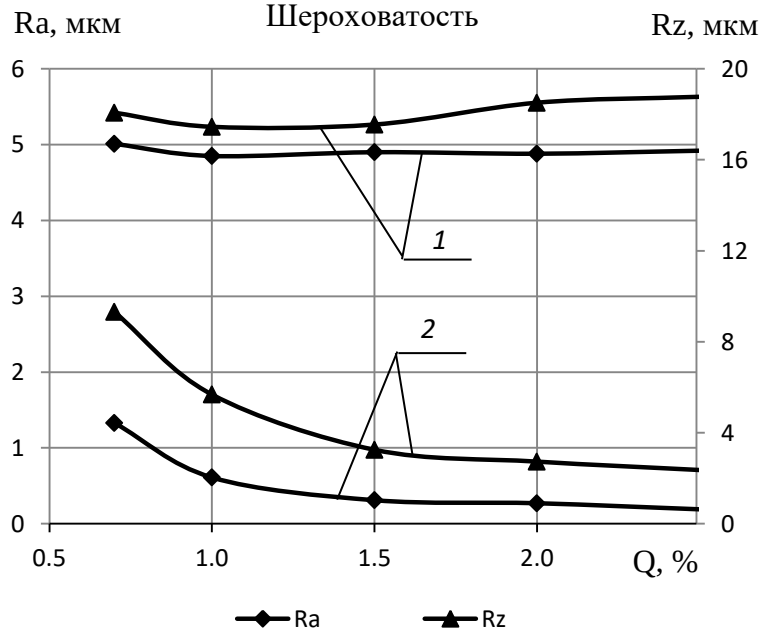
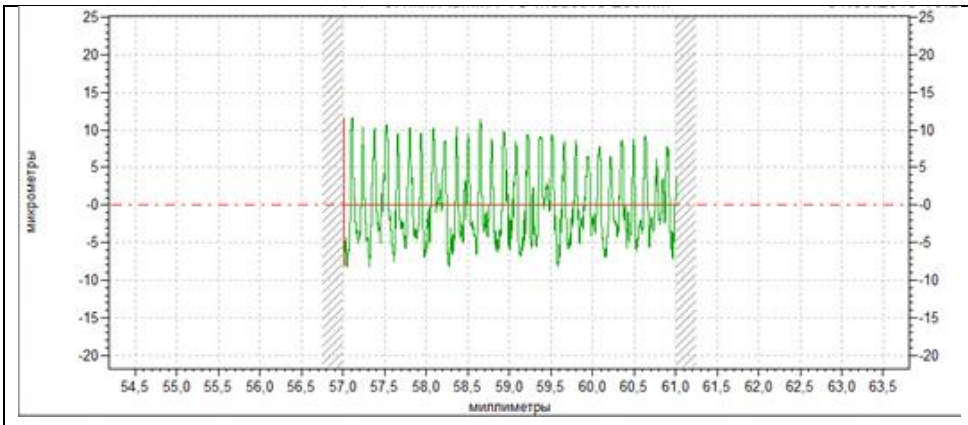
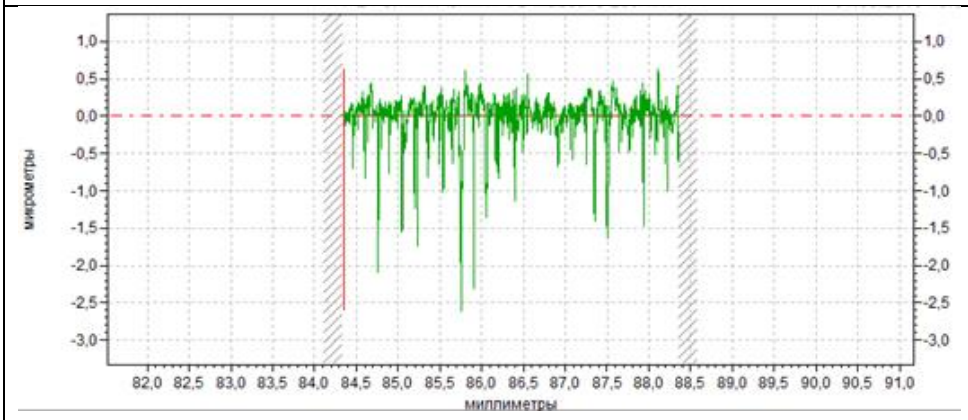


Рисунок 4.20 – Зависимость шероховатости обкатанной поверхности от степени относительного обжатия (Q): исходные (1) и после ППД (2)

На рис. 4.21 показаны профилограммы поверхности образцов из стали 45 до и после правки. Исходная шероховатость поверхности деталей составляет около 5,0 мкм (класс 6). После правки с поперечной обкаткой шероховатость уменьшается до 0,19 мкм (до класса 9).



Исходный микропрофиль (масштаб 1:1)
Ra=4,92 мкм
Rz=18,07 мкм
W_z=15,33мкм
Sm=233 мкм



Микропрофиль при Q=2,5 % (масштаб 10:1)
Ra=0,19 мкм
Rz=2,36 мкм
W_z=3,24мкм
Sm=137 мкм

Рисунок 4.21 – Профилограммы поверхности образцов из стали 45 до и после обкатки

При ППД поперечной обкаткой гладкими плитами очаг деформации распространяется по всей протяженности образующей линии цилиндра, поэтому можно значительно снизить шероховатость поверхности деталей. Это дает более благоприятное условие выглаживания микронеровностей в направлении оси цилиндра. При увеличении величины абсолютного обжатия силы прижимы инструментов на обрабатываемую поверхность увеличиваются. При небольшой степени обжатия происходит неполное выглаживание неровностей, поскольку небольшое удельное давление не позволяет полностью деформировать микронеровности поверхности.

Зависимость шероховатости поверхности от величины абсолютного обжатия качественно одинакова для деталей из различных материалов. При увеличении абсолютного обжатия шероховатость уменьшается, а при определённой его величине изменение шероховатости практически прекращается. При обкатке с небольшими обжатиями плиты контактируют с обрабатываемой поверхностью по вершинам микронеровностей, опорная площадь которых мала. В результате этого на поверхности контакта возникают значительные давления, превышающие предел текучести материала и вызывающие интенсивную пластическую деформацию неровностей. По мере роста абсолютного обжатия увеличивается глубина внедрения плит и растёт площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Кроме этого, при пластической деформации поверхностный слой металла значительно упрочняется, что повышает устойчивость поверхности к пластической деформации. Следовательно, уменьшение шероховатости с увеличением абсолютного обжатия замедляется. При определённых значениях абсолютного обжатия исходные неровности полностью сглаживаются и образуется минимальная шероховатость, благодаря самому процессу обкатки гладкими плитами.

ППД гладкими плитами также влияет на высоту волнистости Wz. Волнистость поверхности – это ряд повторяющихся возвышений и впадин с относительно большим шагом. В отличие от шероховатости поверхности волнистость характеризуется неровностями, имеющими значительно больший шаг, чем неровности, образующие шероховатость. По высоте шероховатость и волнистость оказываются близкими. Границу между шероховатостью, волнистостью и погрешностями формы можно установить по значению отношения шага к высоте неровностей. Отклонения, у которых отношение $l/R < 50$, относят к шероховатости, при $50 \leq l/R \leq 1000$ – к волнистости и при $l/R > 1000$ – к отклонениям формы. Высота волнистости (Wz) – арифметическое среднее значение из пяти значений высоты волнистости, определяемых в пределах пяти равновеликих отдельных участков измерения волнистости как вертикальные расстояния между эквидистантами к средней линии, касающимися измеренного профиля волнистости каждый раз в

наивысшей и наименьших точках. В результате ППД гладкими плитами величина высоты волнистости снижается в 3-4 раза (рис. 4.22).

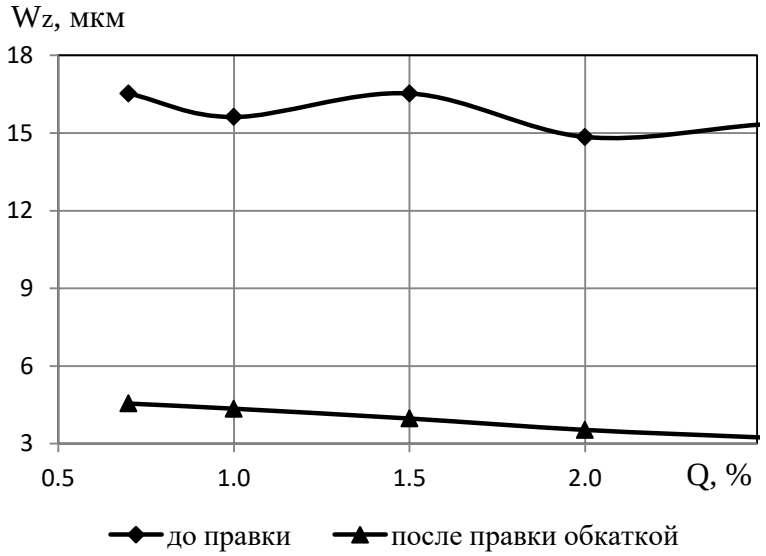


Рисунок 4.22 – Зависимость высоты волнистости от степени относительного обжатия (Q)

С увеличением абсолютного обжатия эффективность снижения высоты волнистости изменяется незначительно. При локальных способах ППД цилиндрических деталей поверхностным пластическим деформированием, при нежесткой технологической системе (станок-приспособление-инструмент-деталь) вследствие появления вынужденных колебаний волнистость поверхности при обработке может увеличиваться. При ППД гладкими плитами длинный очаг деформации вдоль оси заготовки в сочетании с высокой жесткостью технологической системы обеспечивается высокая геометрическая стабильность обработки. Поэтому ППД гладкими плитами приводит к снижению волнистости.

Влияние числа оборотов. При ППД партии деталей из стали 45 с исходной шероховатостью Ra=5 мкм с увеличением числа их оборотов шероховатость деталей после ППД резко уменьшается (рис. 4.23).

Каждый последующий оборот заготовки способствует сглаживанию микрорельефа, полученного на предыдущем обороте. В основном шероховатость значительно уменьшается во время первых оборотов заготовки. С увеличением числа оборотов *n* шероховатость поверхности уменьшается, но в меньшей степени, так как повторные обороты заготовки проводятся уже по сглаженной и упрочненной

поверхности. При числе оборотов больше оптимального значения уменьшение шероховатости прекращается. В зависимости от требуемой шероховатости можно назначать необходимое минимальное число оборотов заготовки.

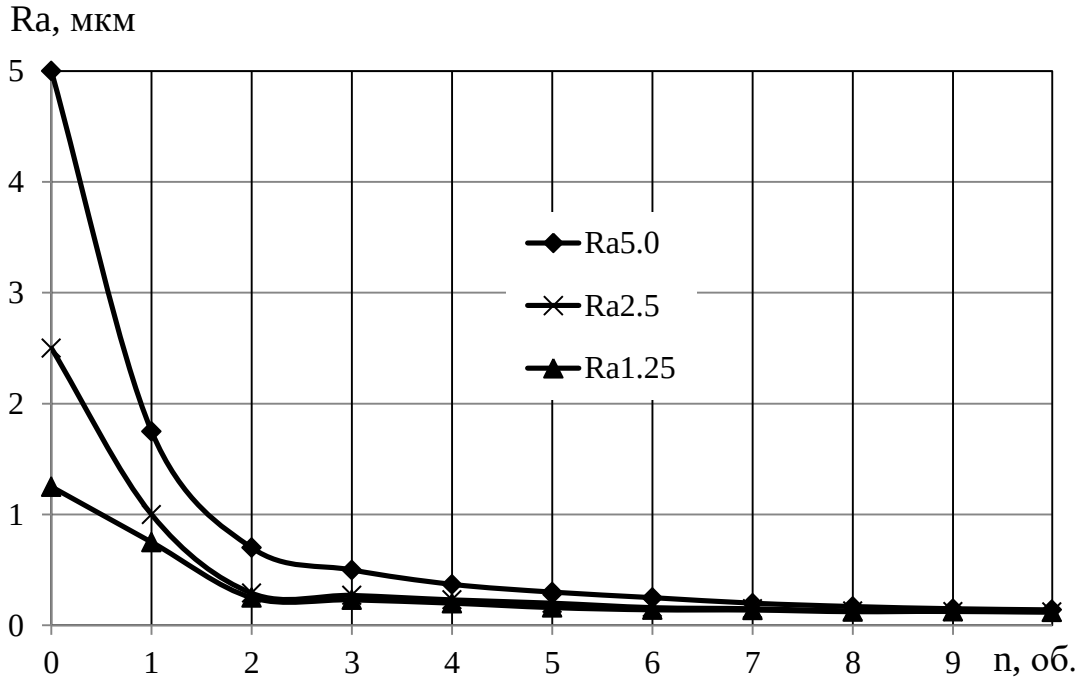


Рисунок 4.23 – Зависимости шероховатости поверхности после ППД от числа оборотов заготовки

Шероховатость упрочненной поверхности зависит так же от исходной шероховатости заготовки. Для трех партий деталей из стали Ст45 с разной исходной шероховатостью была проведена поперечная обкатка с абсолютным обжатием ΔH=0,15 мм. Установлено, что для каждой исходной шероховатости существует рациональное значение числа оборотов заготовки. До этого значения шероховатость сначала сильно снижается, а затем уменьшается в незначительной степени (рис. 4.19). Путем увеличения числа оборотов заготовки можно получить чистую поверхность с шероховатостью Ra=0,12 мкм из грубой поверхности с исходной шероховатостью Ra=5 мкм. Рациональная исходная шероховатость составляет Ra 2,5 мкм, при данной шероховатости после 5 оборотов заготовки шероховатость снижается от шестого до девятого класса.

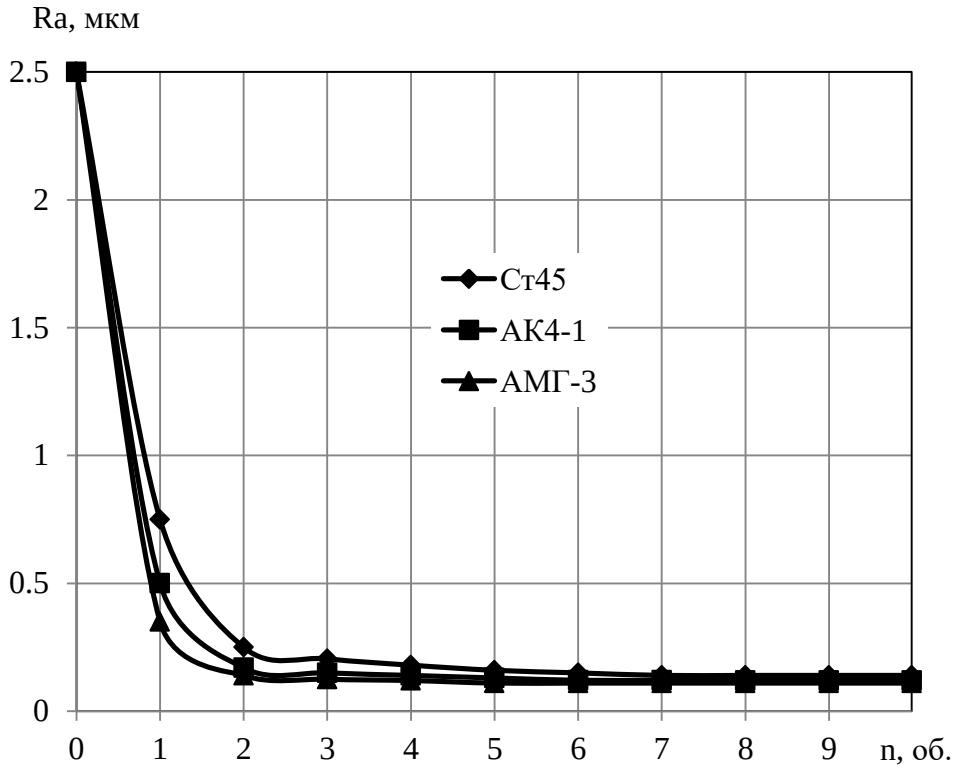


Рисунок 4.24 – Зависимость шероховатости от числа оборотов заготовок, изготовленных из разных материалов

С одинаковым абсолютным обжатием ΔН=0,15 мм получена шероховатость трех партий цилиндрических деталей, изготовленных из разных материалов (рис. 4.24). Исходная шероховатость всех деталей после обработки резанием составляла около Ra=2,5 мкм. Для цветных сплавов с меньшим пределом текучести получена наилучшая чистота поверхности, так как для них рабочее давление легче обеспечивает полное смятие исходных микронеровностей. За два оборота заготовки параметр высоты микронеровности Ra уменьшается почти в 18 раз.

4.5 Определение микроструктуры, микротвердости и глубины наклепа

Микроструктура металлов и сплавов характеризуется величиной, расположением, формой, размером зерна и количеством различных фаз. Эти факторы влияют на физико-механические свойства материала. Как известно, физико-механические свойства поверхностного слоя детали характеризуются глубиной и

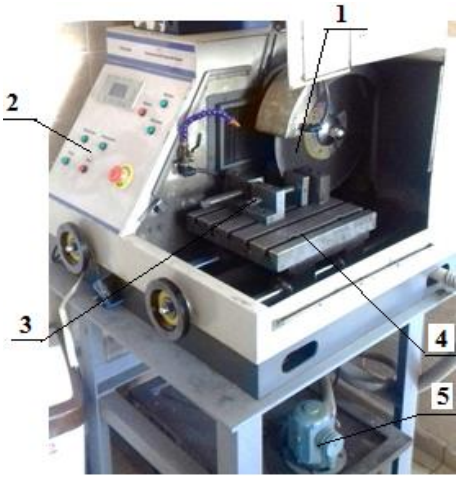
степенью наклепа. Наклеп можно охарактеризовать величиной микротвердости. Результаты измерений микротвердости в поверхностном слое детали позволили выявить эффект упрочнения при ППД.

Для определения микроструктуры, микротвердости и глубины наклепа цилиндрических деталей подготовлены микрошлифы с помощью отрезного станка модели Р100А, автоматического пресса ПОЛИЛАБ С50А и шлифовально-полированного станка модели П12М.

Порядок подготовки микрошлифов:

1. Вырезание образцов

Образцы вырезали на металлографическом отрезном станке модели Р100А в ручном или автоматическом режиме (рис. 4.25). Для исследования металлического изделия с неоднородной по сечению структурой используют поперечный и продольный шлифы; их плоскость соответственно перпендикулярна и параллельна продольной оси изделия. При абразивном мокром отрезании используются отрезные круги, состоящие из абразива и связующей составляющей. Охлаждающая жидкость омывает круг во избежание повреждения образца из-за перегрева и смывает абразив с разрезаемой поверхности. Выбор отрезного круга производится исходя из твердости и пластичности материала. Для резания черных металлов в качестве абразива используется оксид алюминия(Al_2O_3) на бакелитовой основе. Для резания конструкционных сталей используется диск 20А25.



1 – отрезной диск;

2 – пульт управления;

3 – зажимное приспособление;

4 – стол;

5 – насос.

Рисунок 4.25 – Отрезной станок модели Р100А

2. Заливка, механическое шлифование и полирование образцов

Образцы заливали порошком эпоксидной смолы в формы на автоматическом прессе марки ПОЛИЛАБ С50А (рис. 4.26, а). Образцы шлифовали и полировали наждачной бумагой с различной зернистостью. Полученная поверхность должна быть плоской и не иметь завалов. Механическое шлифование и полирование образцов выполняли на автоматическом шлифовально-полированном станке модели П12М (рис. 4.26, б) с периодическим охлаждением водой. Использовано химическое травление для выявления микроструктуры. При травлении стали 45 использовали спирт и 5% раствор кислоты HNO_3.

а) 

б) 

Рисунок 4.26 – Автоматический пресс ПОЛИЛАБ С50А (а) и шлифовально-полированный станок модели П12М (б)

Для определения микроструктуры металла использован металлографический микроскоп марки МЕТ-2 (рис. 4.27), предназначенный для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом поле, а также для исследования объектов в поляризованном свете. С помощью программы Toup View была сфотографирована структура металла на экране компьютера с увеличением от 100 до 1000 раз. Исследования микроструктуры проводили как по продольному и поперечному сечению, так и в осевой зоне и в поверхностном слое цилиндра.



Рисунок 4.27 – Металлографический микроскоп МЕТ-2

Измерение микротвердости. Микротвердость характеризует сопротивление материала пластическому вдавливанию твердого наконечника. В работе использованы микротвердомеры HMV-G21 для измерений твердости металлов сплавов по шкале Виккерса в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007.

Принцип действия микротвердомеров основан на статическом вдавливании наконечника - алмазной пирамиды Виккерса, с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка и пересчетом значения длин диагоналей в значения твёрдости по Виккерсу (HV). Микротвердомеры представляют собой стационарные средства измерений, состоящие из устройства приложения нагрузки и измерительного блока. Микротвердомеры могут быть оснащены одним индентором и двумя объективами или двумя инденторами и четырьмя объективами, а также автоматической поворотной турелью.

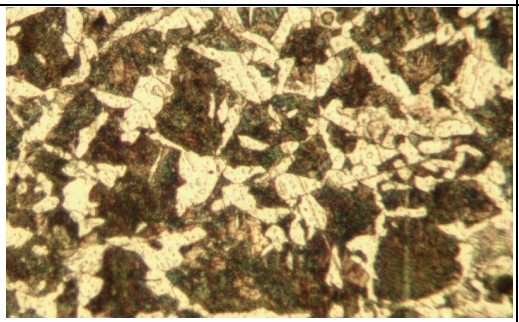
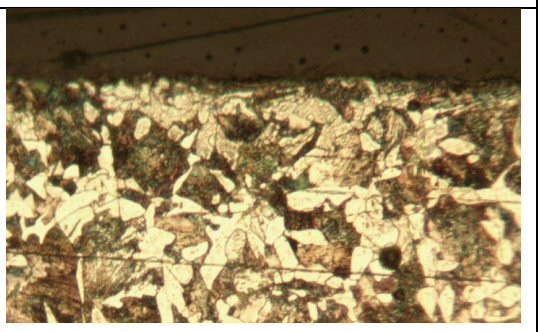
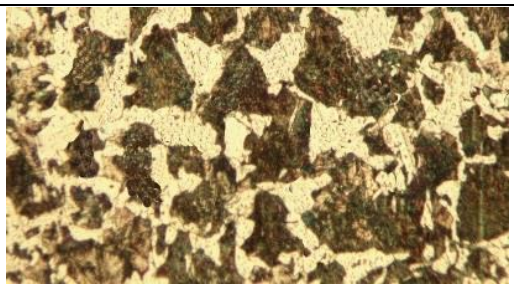
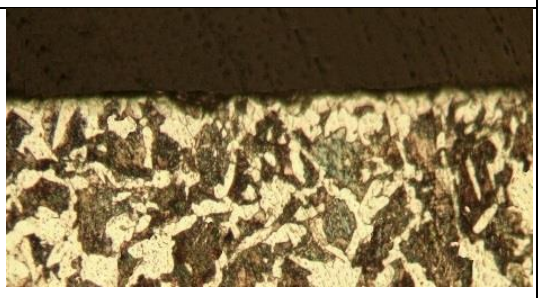


Рисунок 4.28 – Микротвердомеры HMV-G21

К микротвердомерам HMV-G21 подключается персональный компьютер (см. рис. 4.28). Основываясь на изображении отпечатка испытуемой поверхности, полученной CCD (ПЗС) камерой, выполняется автоматическое измерение длины диагонали отпечатка и вычисляется твердость по Виккерсу. В стандартном исполнении данная система снабжена не только функцией, которая автоматически измеряет длину диагонали отпечатка, но снабжена функцией, которая отображает изображение поверхности образца на дисплее ПК и функцией для обработки программы начальной настройки условий испытания, сохранения результатов испытания, анализа результатов испытания и т.д. на ПК. Микротвердомеры HMV-G21 могут быть оборудованы предметным столиком с электроприводом. Доступ к метрологически значимой части ограничен конструкцией микротвердомеров.

Результаты экспериментальных исследований. Результаты исследования показали, что при обкатке гладкими плитами происходит дробление исходной структуры материала, повышается однородность структуры, формируется более равномерная текстура материала поверхностного слоя (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – Микроструктура образца (Ст45) после ППД гладкими плитами (х400 раз)

Тип	Осевая зона	Поверхностная зона
Поперечное сечение		
Продольное сечение		

В сердцевине цилиндра содержатся зерна феррита размером 20 – 60 мкм и зерна перлита размером 30 – 80 мкм, а в поверхностной зоне, которая непосредственно подвергается деформированию, наблюдается более мелкозернистая структура с размером зерен феррита 10 – 40 мкм и зерен перлита 15 – 45 мкм.

Микроструктура в данной зоне характеризуется преобладанием зерен, сжатых в радиальном направлении и вытянутых в осевом направлении. Измельчение структуры является следствием дробления зерен металла. В таблице 4.5 представлены среднеарифметические значения размеров двадцати зерен для каждого образца в каждой зоне. По результатам измерений (табл. 4.5) видно, что с увеличением величины абсолютного обжатия происходит более эффективное деформирование и дробление зерен. Получено уменьшение размеров перлита и феррита в поверхностном слое, поэтому прочность деталей повышается.

Таблица 4.5 – Размеры зерен микроструктуры в зависимости от величины абсолютного обжатия

Степень относительного обжатия (Q, %)	Размер зерна вдоль оси, мкм		Размер зерна поперёк оси, мкм	
	край	середина	край	середина
0,7	25,8	37,3	17,1	48,6
1,0	24,7	36,7	16,7	48,3
1,5	23,3	36,5	15,4	47,9
2,0	24,5	35,9	14,9	46,7
2,5	23,7	35,5	14,1	46,8

Распределение микротвердости по радиальному направлению представлено на рис. 4.29, из которого видно, что микротвердость достигает максимального значения на поверхности и уменьшается при переходе к центру. Для каждого значения обжатия, начиная с некоторой толщины, микротвердость практически не изменяется, достигая минимального значения – исходной микротвердости заго-

товки. С увеличением величины абсолютного обжатия максимальная микротвердость на поверхности растет. Наибольшая эффективность упрочнения достигается при степени относительного обжатия 2,5 %. При этом микротвердость повышается на 59% по сравнению с исходной. Из рис. 4.29 можно определить также глубину наклёпа, которая при данных условиях нагружения изменяется в пределах от 0,7 до 1,45 мм.

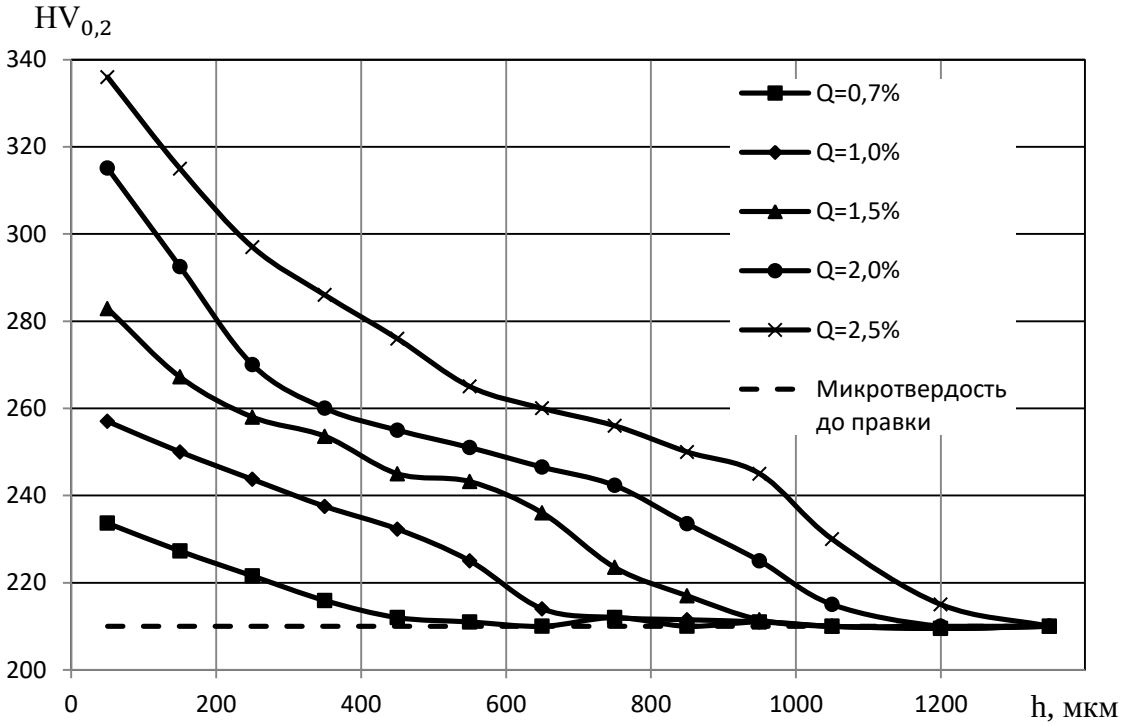


Рисунок 4.29 – Распределение микротвердости в поверхностном слое в зависимости от степени относительного обжатия (Q)

По результатам конечно-элементного моделирования в работе [30] и в разделе 3.3 с помощью программы ANSYS Workbench была определена глубина (h) пластически деформированного слоя детали. Зависимость глубины h от степени относительного обжатия (Q) представлена на рис. 4.30. На графике показаны результаты определения глубины наклепа деталей с помощью программы ANSYS (кривая 1) и измерения микротвердости по поперечному сечению деталей по эксперименту на микротвердомер HMV-G21 (кривая 2) после ППД.

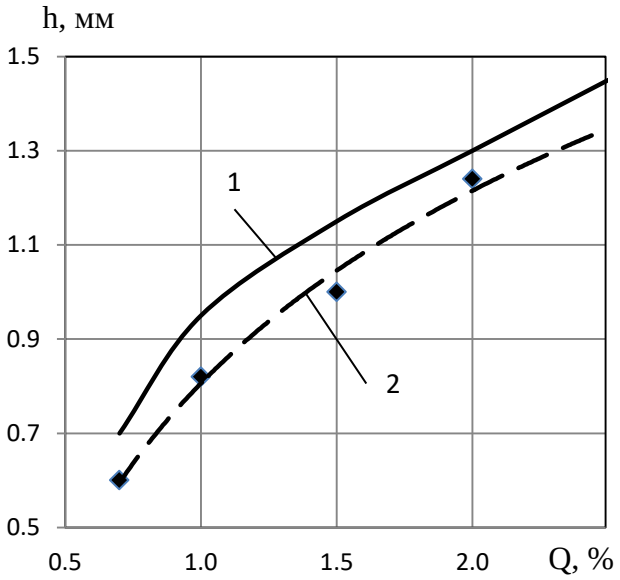


Рисунок 4.30 – Зависимость глубины наклепа от степени относительного обжатия (Q): результаты расчета (1) и эксперимента (2)

С увеличением степени относительного обжатия глубина наклепа возрастает. Результаты экспериментального измерения глубины наклепа деталей несколько меньше (на 15-20%), чем при расчете по компьютерной программе. Это можно объяснять тем, что зона заметного увеличения микротвердости материала всегда меньше, чем зона пластической деформации. Поэтому результаты определения глубины наклепа расчетным путем необходимо уменьшать на 15-20%, чтобы получить более корректный результат.

Выводы по главе 4

1. Результаты экспериментальных исследований показали, что способ ППД выправленных нежестких деталей, основанный на использовании обработки цилиндрической поверхности поперечной обкаткой гладкими плитами, позволяет обеспечить не только высокую геометрическую точность цилиндрических деталей и стабильность формы и размеров, но и высокое качество поверхностного слоя.

2. Результаты измерения геометрических параметров деталей установлено, что после ППД (D = 10 мм, L = 200 мм, $f_{исх}^{max} = 0{,}5$ мм, Q = 1,5 %) деталей из стали 45 их диаметр уменьшается на 0,4%, максимальное отклонение от круглости уменьшается на 39%, максимальный остаточный прогиб уменьшается до 6 мкм. Полученные результаты свидетельствуют, что ППД гладкими плитами обеспечивает высокую геометрическую точность деталей.

3. По результатам исследования шероховатости поверхности установлено, что ППД гладкими плитами позволяет существенно снизить шероховатость поверхности деталей. Так, после ППД цилиндра из стали 45 с исходной шероховатостью Ra = 5 мкм со степенью относительного обжатия Q = 1,5 %, получена шероховатость Ra = 0,31 мкм, которая положительно сказывается на качестве поверхности деталей малой жесткости.

4. Результаты измерения остаточных напряжений показали, что после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами формируются равновесные остаточные напряжения на поверхности детали, а в поверхностных слоях заготовки – остаточные напряжения сжатия. Полученные результаты позволяют утверждать, что способ ППД гладкими плитами обеспечит стабильность и повышение износостойкости деталей машин.

5. Результаты исследования микроструктуры и микротвердости показали, что при ППД гладкими плитами происходит дробление исходной структуры материала, повышается однородность структуры, формируется более равномерная текстура материала поверхностного слоя. Микротвердость достигает максимального значения на поверхности и уменьшается при переходе к центру деталей. Так, при ППД со степенью относительного обжатия 2,5 %, микротвердость на поверхность деталей повышается на 59% по сравнению с исходной. При этом глубина наклепа равна 1,45 мм. Эти результаты подтверждают, что способ ППД поперечной обкаткой гладкими плитами обеспечивают получение более прочного поверхностного слоя.

ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ППД ДЕТАЛЕЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКОЙ ГЛАДКИМИ ПЛИТАМИ

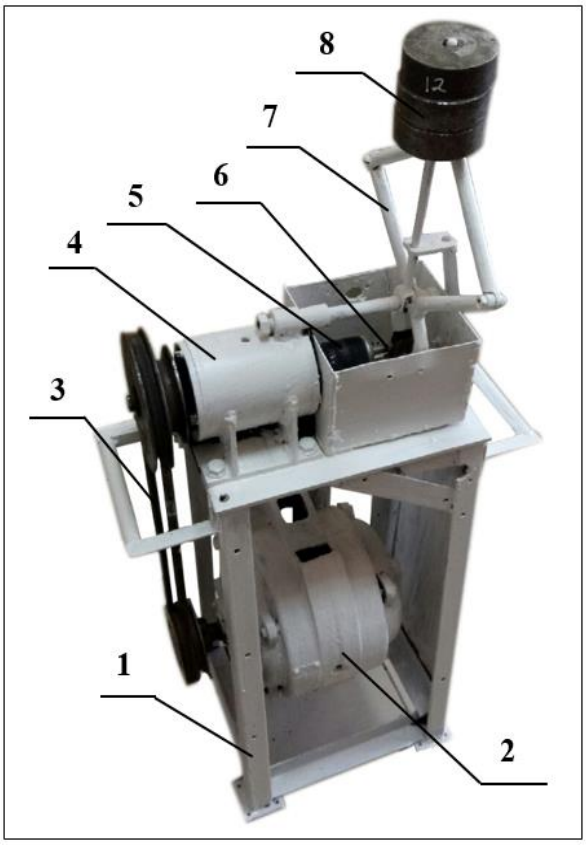
5.1 Определение износостойкости выправленных деталей

ППД выправленных цилиндрических деталей, основанное на поперечной обкатке гладкими плитами приводит к формированию равновесных сжимающих остаточных напряжений в поверхностных слоях, повышению поверхностной твердости и благоприятному изменению микрогеометрии поверхностей. В результате в зависимости от функционального назначения и условий эксплуатации деталей повышается их усталостная и контактная прочность, износостойкость и сопротивление коррозии, гидроплотность и маслоудерживающая способность [6, 7, 14, 18, 22, 64, 66, 84, 86]. Износостойкость – важнейшая из них, характеризующая сопротивление поверхности детали изнашиванию. В процессе износа происходит изменение формы и размеров сопрягаемых деталей, возможно, изменение физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, нарушаются условии правильной эксплуатации [35, 41, 76, 78]. Таким образом, износостойкость является одной из основных характеристик, определяющих долговечность деталей и машин. Кроме этого, износостойкость имеет огромную экономическую важность для всех без исключения изделий и производств [62, 77].

Для оценки износостойкости деталей после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами необходимо было провести экспериментальные исследования по износу деталей. Наряду с этим необходимо было сравнить износостойкость деталей, после правки упругопластическим изгибом, правки стесненным сжатием [9], правки ППД гладкими плитами.

Для исследования износостойкости деталей использовали установку, показанную на рисунке 5.1. Установка содержит корпус 1, в котором размещен электродвигатель 2 привода вращения. Вращение от электродвигателя 2 с помощью

ременной передачи 3 передается на приводную головку 4 и патрон 5, предназначенный для закрепления образца 6 и сообщения ему вращательного движения. В корпусе установлен механизм нагружения для прижатия к образцу контртел, представляющих собой две половины (вкладыши) резиновой втулки. Вкладыши с помощью механизма нагружения, состоящего из груза 8 и рычага 7, прижимаются с определенным усилием к рабочей поверхности образца (см. рис. 5.1).



1 – корпус,
2 – электродвигатель,
3 – ременная подача,
4 – приводная головка,
5 – патрон,
6 – образец,
7 – рычаг,
8 – груз.

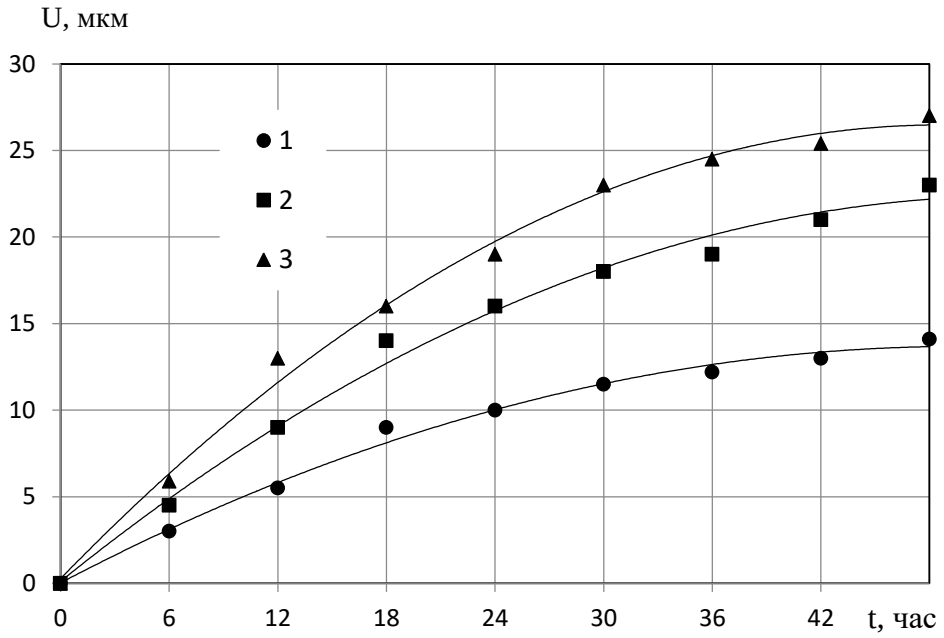
Рисунок 5.1 – Установка для исследования износостойкости деталей

Режимы работы: Частота вращения образца выбрана 1250 об/мин. Нагрузка в зоне контакта составляла 150 Н и обеспечена грузом механизма нагружения. Контртелом служил материал из резины. Эксперименты проводили в воде, подвергая образец износу в течение двух суток. Через заданные промежутки времени (6 часов), образцы снимали с экспериментальной установки и измеряли его диаметр. Каждый раз диаметр измерен в трех разных сечениях образца в изношенном зоне микроиндикаторной головкой с точностью 1 мкм. Среднее значение из трех полученных измерений принимали за диаметр образца после изнашивания.

Износостойкость образцов (U) оценивается по абсолютной величине износа по формуле:

$$U = \frac{\Delta D}{2} = \frac{D_t - D_0}{2}, \tag{5.1}$$

где D_0 – исходный диаметр образцов; D_t – диаметр образцов после изнашивания.



1 – поперечной обкаткой гладкими плитами,

2 – стесненным сжатием [9], 3 – упругопластическим изгибом.

Рисунок 5.2 – Абсолютный износ деталей в зависимости от способа правки:

На рисунке 5.2 показаны результаты исследования износостойкости деталей из стали 45 при разных способах правки. Видно, что правка ППД поперечной обкаткой гладкими плитами существенно повышает износостойкость деталей. Максимальная износостойкость наблюдается у деталей, после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами, а минимальная – у деталей, выправленных упругопластическим изгибом. Износостойкость деталей после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами увеличивается почти в 2 раза. Таким образом, применение правки ППД, основанной на поперечной обкатке гладкими плитами приводит к высокому повышению износостойкости деталей машин.

5.2 Оценка геометрической стабильности нежестких цилиндрических деталей после ППД гладкими плитами

Технологические остаточные деформации нежестких валов обычно возникают на завершающем этапе изготовления и требуют проведения операций правки. Устранить такие деформации можно различными способами правки: упругопластическим изгибом, растяжением, правки ППД гладкими плитами и т.д. Причём степень исправления столь малых деформаций определяется технологическими возможностями способов правки. При определённых условиях все перечисленные способы правки позволяют добиться высокой точности изделий. Однако при этом также необходимо обеспечить их высокую геометрическую стабильность (точность во времени). Это требование является одним из принципиальных вопросов при выборе способа правки деталей на завершающем этапе изготовления.

Для оценки геометрической стабильности деталей после правки упругопластическим изгибом, растяжением или правки гладкими плитами было проведены экспериментальные исследования. Исследование геометрической стабильности изделий после правки указанными способами проводили в термоконстантном шкафу при температуре 20°С, в течение 360 суток. В качестве образцов использовали цилиндрические заготовки (длина 200 мм, диаметр 10 мм) из стали 45 как наиболее распространенного конструкционного материала, применяемого при изготовлении валов ответственного назначения [38]. Образцы имели одинаковую форму изогнутой оси и максимальные остаточные деформации изгиба равные по величине 0,5 мм. Для получения 9 образцов с такими параметрами деформированного состояния потребовалось при одинаковых условиях и режимах обработать точением 15 валов.

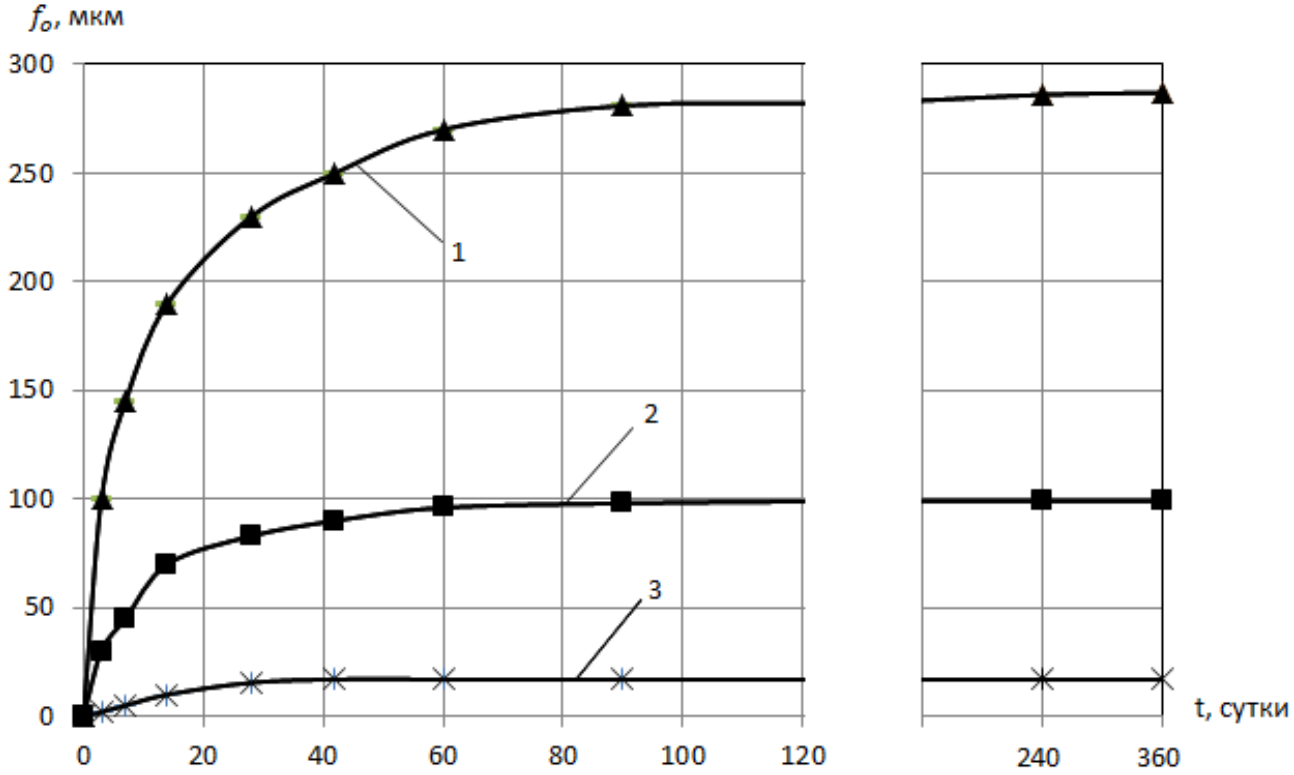
По результатам измерения деформаций было подготовлено 3 партии по 3 образца в каждой партии, предназначенные для правки упругопластическим из-

гибом, растяжением и правки гладкими плитами и 1 партия из 3 образца с максимальными остаточными деформациями изгиба равными по величине 0,7 мм – для правки упругопластическим изгибом. После правки образцов в каждой партии для дальнейших исследований геометрической стабильности оставили по 2 образца с практически одинаковым (более 95%) исправлением исходной деформации изгиба.

Для измерения геометрических искажений образцов использовали измерительную машину КИМ Carl Zeiss Contura G2 Aktiv, которая позволяет с точностью 1 мкм (см. рис. 4.4) измерить отклонение от прямолинейности оси с течением времени (f_o). Измерения проводили последовательно в течение 360 суток после правки образца. Вначале через 3 суток после обработки, затем через 7 суток, далее через 2 недели; 4 недели и 6 недель, потом через 2; 3 месяца и 8 месяцев и, наконец, через год.

Результаты исследований (рис. 5.3) показали, что у образцов, подвергнутых правке гладкими плитами, заметное отклонение от прямолинейности оси валов f_o происходило в течение первых 4 недель и составило в среднем 15 мкм, в дальнейшем перемещение было весьма незначительным – не более 1 мкм. У образцов после правки растяжением значительное отклонение от прямолинейности оси валов f_o происходило в течение 2 месяцев и составило в среднем 98 мкм, в дальнейшем величина перемещения составила около 1,5 мкм. После правки образцов упругопластическим изгибом значительное отклонение от прямолинейности оси валов f_o продолжалось течение 30 суток и в конечном итоге составило в среднем 283 мкм, в дальнейшем перемещение увеличилось не более чем на 2 мкм. В тоже время после устранения остаточной деформации изгиба равной 0,7 мм после правки упругопластическим изгибом значительное отклонение от прямолинейности оси валов f_o составило в среднем 393 мкм. Этот результат свидетельствует о том, что с увеличением устраняемого отклонения от прямолинейности оси и, соответственно, интенсивности пластической деформации материала при правке

образцов, происходит увеличение неравновесного распределения остаточных напряжений относительно нейтральной оси.



1 – упругопластическим изгибом; 2 – растяжением;

3 – поперечной обкаткой гладкими плитами.

Рисунок 5.3 – Изменение отклонения от прямолинейности оси с течением времени после правки валов с исходным прогибом ($f_{\text{исх}} = 0{,}5$ мм)

В целом полученные результаты хорошо согласуются с выводами, сделанными на основании теоретических исследований напряжённо-деформированного состояния выправленных изделий. Несколько больший уровень развития остаточных деформаций образцов, подвергнутых правке растяжением, по сравнению с образцами после правки поперечной обкаткой гладкими плитами, можно объяснить тем, что при обработке этим способом не только обеспечена стабильность геометрической формы и размеров, но и повышено качество поверхностного слоя деталей.

5.3 Определение рациональных параметров процесса ППД гладкими плитами

Основными параметрами процесса ППД поперечной обкаткой гладкими плитами выправленных цилиндрических деталей является коэффициент изгиба, степень относительного обжатия Q, число оборотов заготовки *n,* угол захвата заготовки *α*, скорость подвижной плиты *V,* мощность электродвигателя, влияющие непосредственно на стабильность и качество деталей.

По результатам моделирования и экспериментальных исследований получены следующие рациональные параметры процесса ППД:

– Коэффициент изгиба и степень относительного обжатия являются главными параметрами, которые влияют на образование остаточных напряжений и качество деталей. При ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей из стали 45 с отношением между длиной распределенной нагрузки и длиной заготовки *l/L* равным 0,7 коэффициент изгиба находятся в диапазоне 5,3-5,5. Для повышения качество правки изгибом рекомендуется на выступ верхней плиты нанести слой резины, способной выдерживать большие давления. В этом случае распределенная нагрузка обеспечивать полное касание выступа по контуру детали. Рациональные значения степени относительного обжатия при ППД цилиндрических деталей находятся в диапазоне 0,7-2,5%. Если повысить степень относительного обжатия за пределы рационального значения максимальная интенсивность остаточных напряжений значительно превышает предел текучести материала, и поэтому с такими режимами обработки возможно разрушение материала на поверхности детали. Кроме этого, существенно повышаются растягивающие остаточные напряжения в центральной зоне цилиндра, которые могут достигать предел текучести материала, что приведет к образованию трещин и разрушению материала в центральной области цилиндрических изделий.

– Число оборотов заготовки незначительно влияет на напряженное состояние цилиндрических деталей при ППД. В результате экспериментальных исследований установлено, что при увеличении числа оборотов заготовки значительно

уменьшается шероховатость и отклонение от круглости обработанной поверхности, но не приводит к дополнительному росту микротвердости поверхности и не увеличивают глубину наклепа. При поперечной обкатке гладкими плитами при многих оборотах заготовки происходит только существенное снижение микронеровностей поверхности при отсутствии дефектов, но при этом производительность процесса ППД снижается. Поэтому рациональное число оборотов заготовки при обкатке гладкими плитами рекомендуется в пределах 3-5 оборотов.

– Для обеспечения стабилизированной обкатки ширина гладких плит должна быть больше длины обрабатываемой детали. При большой ширине плит усложняется конструкция правильно-обкатного станка и повышается энергоемкость поперечной обкатки. Следовательно, правка гладкими плитами целесообразно применять для нежестких цилиндрических деталей с длиной, не превышающей одного метра. При поперечной обкатке в местах контакта заготовки с инструментом не выделяется значительной теплоты. Поэтому материал плит должен иметь значительное превышение твердости по сравнению с твердостью обрабатываемой заготовки, при этом не требуется иметь высокую красностойкость (теплостойкость) материала. Для изготовления плит можно использовать углеродистые и низколегированные инструментальные стали (У10А, У11А, У12А, У13А, 11ХФ, 13Х, ХВ4, В2Ф, Х, 9ХС, ХВГ, ХВСГ), т.к. они обладают достаточной твердостью, прочностью, износостойкостью, хорошей обрабатываемостью резанием и сравнительно низкой стоимостью. Эти металлы, имеющие твердость HRC 30... 35, после термообработки имеют твердость HRC 56...64.

– Шероховатость плит значительно влияет на микрогеометрию обработанной поверхности, так как микронеровности плит копируются непосредственно на обработанную поверхность. Следовательно, шероховатость плит необходимо снижать до требуемой шероховатости детали. Но слишком гладкие поверхности плит приводят к уменьшению трения между плитами и заготовкой, это снижает необходимое сцепление заготовки с плитами в процессе обработки. Таким образом, рациональная шероховатость плит должна находиться в диапазоне Ra = 0,08-0,16 мкм.

– Основные геометрические параметры плит – это угол захвата заготовки α и угол для выхода заготовки β. Максимальные значения этих углов ограничены условием захвата заготовок в начальный момент обработки и идентичностью распределения напряжений по длине окружности обработанных цилиндрических деталей. Рациональные значения этих углов находятся в диапазоне 2-8°. Длина заходной части плиты выбирается в зависимости от диаметра заготовки с учетом того, что длина заходной части находится в пределах 1-1,5 раз от длины окружности обрабатываемых деталей. Заготовка перед правкой изгибом фиксируется в горизонтальном и вертикальном направлении с помощью заходной части и упоров, установленных на торце неподвижной плиты.

– Скорость движения подвижной плиты незначительно влияет на качество деталей. Средняя скорость поперечной обкатки составляет 0,5-5 м/мин. В лабораторных условиях использован винтовой механизм для преобразования вращательного движения в поступательное. При этом скорость подвижной плиты находилась в приделах 0,5-1 м/мин. На производстве в качестве силового привода можно использовать гидравлический поперечно-строгальный станок. Установка прокатки крепится на столе станка в виде массивного литого башмака, в котором установлены нижняя неподвижная плита и верхняя подвижная плита, размещенная в направляющих скольжения. При данной конструкции скорость движения подвижной плиты легко достигает 5 м/мин.

– При ППД поперечной обкаткой гладкими плитами заготовки в местах контакта с инструментом нагреваются незначительно. Кроме этого, процесс поперечной обкатки заготовки осуществляется благодаря трению между заготовкой и плитами, а использование масла снижает данное трение. Поэтому для ППД гладкими плитами не рекомендуется использовать технологическую смазку.

Выбор электродвигателя и кинематический расчет лабораторной установки. Кинематическая схема процесса ППД приведена на рис. 5.4.

Силу поперечной обкатки гладкими плитами P (см. рис. 2.17), действующую на цилиндрическую деталь в вертикальном направлении, определяют по формуле:

$$P = \sigma_{\rho,\text{ср}} \cdot A. \quad (5.2)$$

где $\sigma_{\rho,\text{ср}}$ – среднее контактное нормальное напряжение (контактное давление); А – контактная площадь цилиндра с плитами.

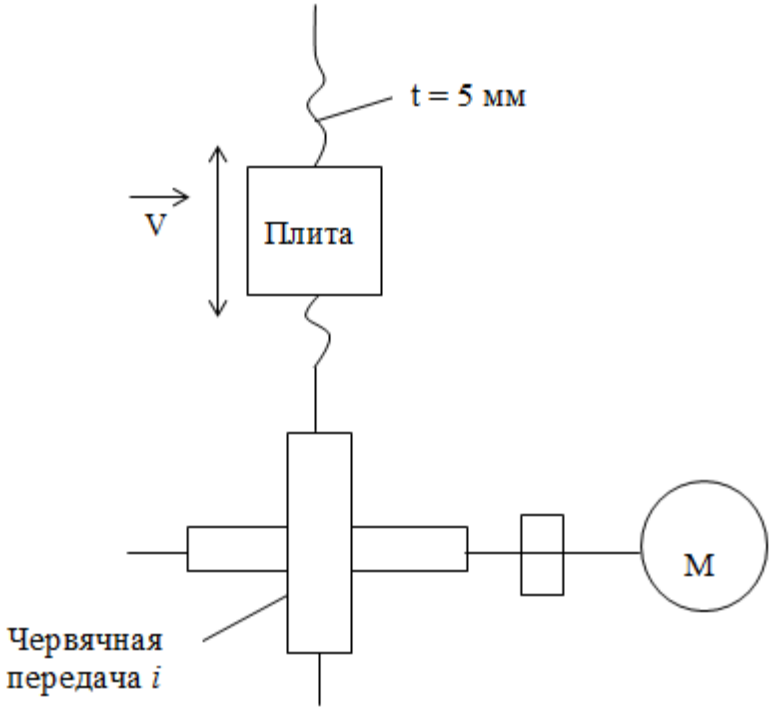


Рисунок 5.4 – Кинематическая схема процесса ППД выправленных деталей

Используя формулу (2.39), контактная площадь определятся:

$$A = L \cdot b = L \cdot \sqrt{yd + 2y^2}. \quad (5.3)$$

где L – длина цилиндра, b – ширина контакта между цилиндром и плитой, y – половина величины абсолютного обжатия.

В лабораторных условия, исследовали цилиндр с максимальным диаметром 10 мм и длиной 200 мм. При этом y = 0,215 мм и d = 9,57 мм. С помощью программы ANSYS Workbench, выполнено моделирование процесса ППД гладкими плитами с максимальным абсолютным обжатием ΔH=2y=0,43 мм, получено максимальное рабочее нормальное напряжение $\sigma_{\rho,\text{ср}} = 1227$ МПа (рис. 5.5).

Тогда, максимальная сила поперечной обкатки гладкими плитами P равна:

$$P = \sigma_{\rho,\text{ср}} \cdot A = \sigma_{\rho,\text{ср}} \cdot L \cdot \sqrt{yd + 2y^2} = 1227 \cdot 200\sqrt{0{,}215 \cdot 9{,}57 + 2 \cdot 0{,}215^2}$$
$$= 359827 \text{ Н}.$$

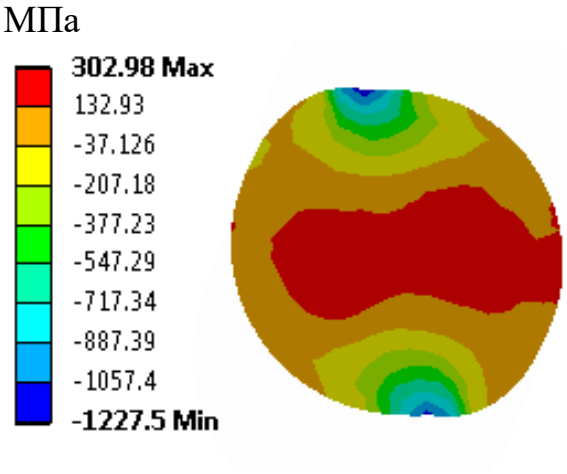


Рисунок 5.5 – Рабочие нормальные напряжения (при ΔH=0,43 мм)

Принимаем коэффициента полезного действия (КПД) передач, показанных на рис. 5.4:

- КПД потери в муфтах: $\eta_1 = 0{,}98$;
- КПД червячной передачи: $\eta_2 = 0{,}9$;
- КПД винтовой передачи: $\eta_3 = 0{,}96$;
- КПД потери в опорах трех валов: $\eta_0^3 = 0{,}99^3$;

КПД всего привода: $\eta_{общ} = \eta_0^3 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0{,}99^3 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}96 = 0{,}82$.

Требуемая мощность электродвигателя:

$$P_{дв} = \frac{P \cdot V}{\eta_{общ}} = \frac{359827 \cdot 0{,}5}{60 \cdot 0{,}82} = 3656 \text{ Вт}.$$

где V – скорость подвижной плиты (м/с).

Выбираем ближайшие по мощности электродвигатели с повышенным пусковым моментом: MS100L3-4, у которого N = 4 Квт и n = 1420 об/мин.

Частота вращения винта:

$$n_в = \frac{V}{t} = \frac{0{,}5 \cdot 1000}{t} = \frac{500}{t},$$

где t – шаг винта.

Определяем передаточные отношения привода:

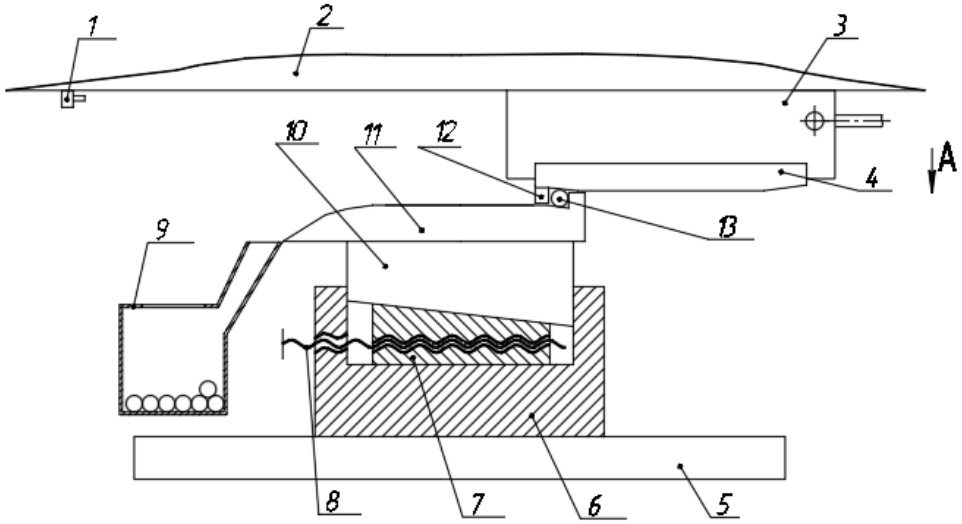
$$i = \frac{n}{n_в} = \frac{1420 \cdot t}{500} = 2{,}84 \cdot t. \qquad (5.4)$$

Из формулы (5.4) выбрали шаг винта t = 5 мм, передаточное отношение червячной передачи i = 15.

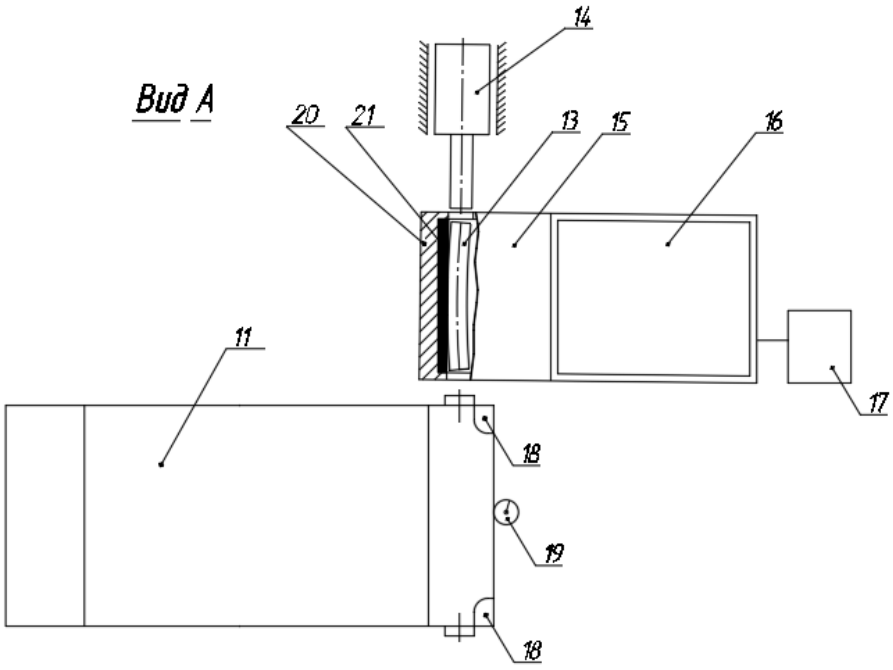
5.4 Проектирование автоматизированного комплекса для повышения качества нежестких цилиндрических деталей

В условиях серийного производства для обеспечения высокой производительности труда предлагается использовать устройство для непрерывной ППД выправленных цилиндрических деталей гладкими плитами [60, 61]. На рисунке 5.6. а) изображена схема предлагаемого устройства, общий вид сборки, а вид сверху устройства показан на рисунке 5.6. б). Элементам устройства присвоены следующие цифровые обозначения:

1 – Концевой включатель
2 – Направляющая
3 – Ползун
4 – Подвижный деформирующий инструмент
5 – Станина
6 – Стол
7 – Нижний клин
8 – Винт
9 – Ящики для обработанных деталей
10 – Верхний клин
11 – Неподвижный деформирующий инструмент
12 – Выступ
13 – Заготовка
14 – Толкатель
15 – Бункер
16 – Автоматизированное устройство для контроля диаметральных размеров и искривления формы деталей типа валов и осей (патент РФ №2218260) [57]
17 – Компьютер
18 – Опоры
19 – Индикатор
20 – Лоток
21 – Датчик



а)



б)

Рисунок 5.6 – Устройство для ППД выправленных цилиндрических деталей гладкими плитами: а) – вид сборку; б) – вид сверху

Устройство содержит станину 5, на которой смонтирован стол 6 с механизмом регулирования высоты неподвижного деформирующего инструмента 11, состоящим из верхнего клина 10, нижнего клина 7 и винта 8, а также направляющие 2, в которых совершает возвратно-поступательное движение ползун 3 с подвиж-

ным деформирующим инструментом 4 с выступом 12. Деформирующий инструмент 11 имеет две опоры 18 для изгиба заготовки при правке изгибом. Привод ползуна 3 является кривошипно-кулисным. На направляющих установлены включатель 1, который срабатывает и дает сигнал на толкатель 14 с помощью которого заготовки 13 из лотка 20 выталкиваются в зону обработки сбоку. Установлен ящик 9 для размещения готовых изделий. Автоматизированное устройство 16 для контроля диаметральных размеров и искривления формы деталей типа валов и осей, подключено к компьютеру 17, работает следующим образом: после загрузки партии деталей, включается контролирующее устройство и компьютер. Индикатор 19, подключен к компьютеру 17 для измерения общего прогиба. Винт 8 для регулирования значения абсолютного обжатия [60].

Устройство работает следующим образом. Автоматизированное устройство 16 измеряет диаметральные размеры и искривление формы заготовки, которое дает сигнал на компьютер 17. На компьютере 17 определяются значения общего прогиба заготовки и информация передается в устройство 19. Далее заготовка перемещается в лоток 20 через бункер 15 и здесь датчик 21 управляет направлением изогнутости заготовки. При подходе ползуна 3 в крайнее правое положение ползун действует на включатель 1, который дает сигнал на толкатель 14. В результате заготовка 13 из лотка перемещается в зону обработки. Далее ползун 3 перемещается вправо и останавливается после касания заготовки 13 с выступом 12. Затем ползун 3 продолжает перемещаться вправо на величину общего прогиба. При перемещении ползуна 3 в направлении справа налево происходит захват заготовки 13 и производится поперечная обкатка заготовки. В конце хода ползуна 3, готовое изделие перемещается в приемный ящик 9. После этого процесса работы устройства повторяется.

В условиях серийного производства способ оценки качества изделий становится трудоемким и малопроизводительным. Для решения этой проблемы использовано устройство для автоматизированного контроля диаметральных размеров и искривления формы деталей типа валов и осей (патент РФ №2218260) (рис. 5.7) [57].

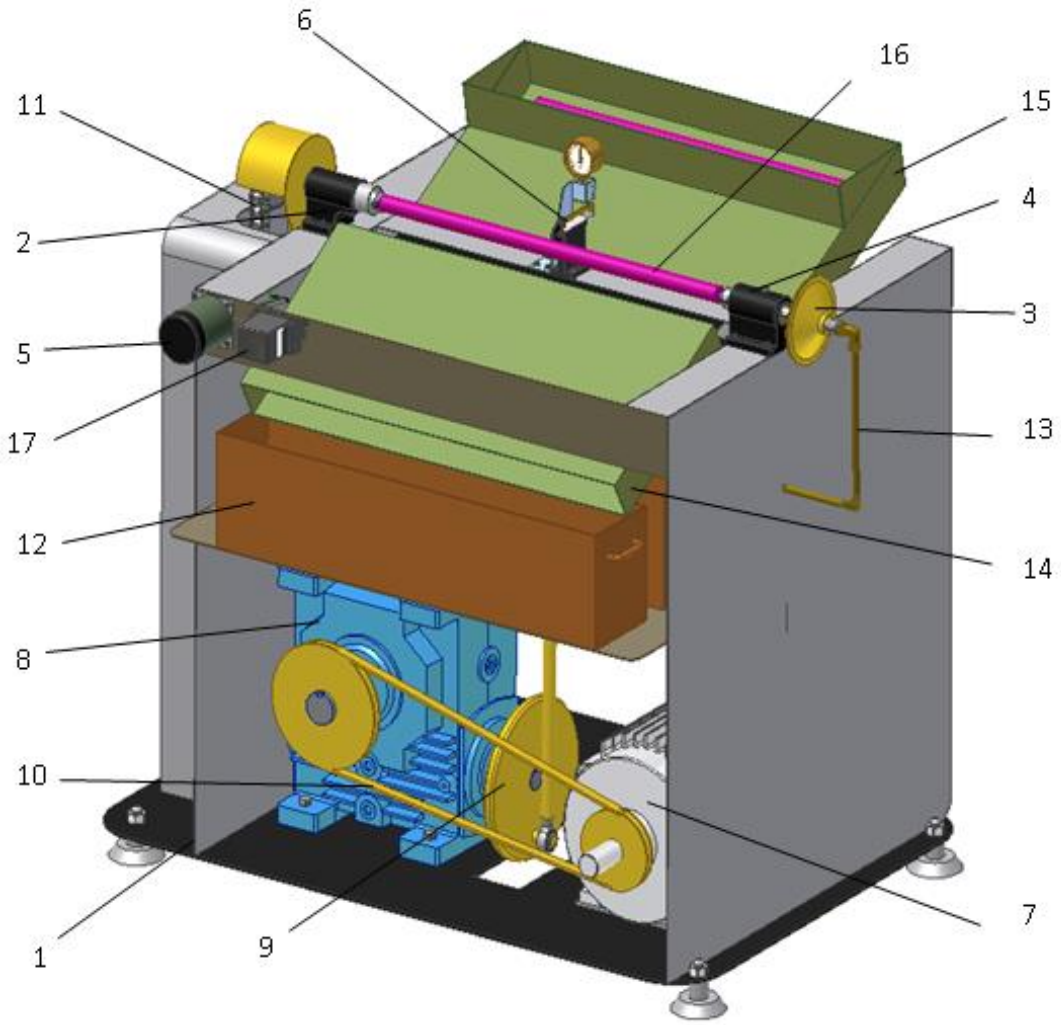


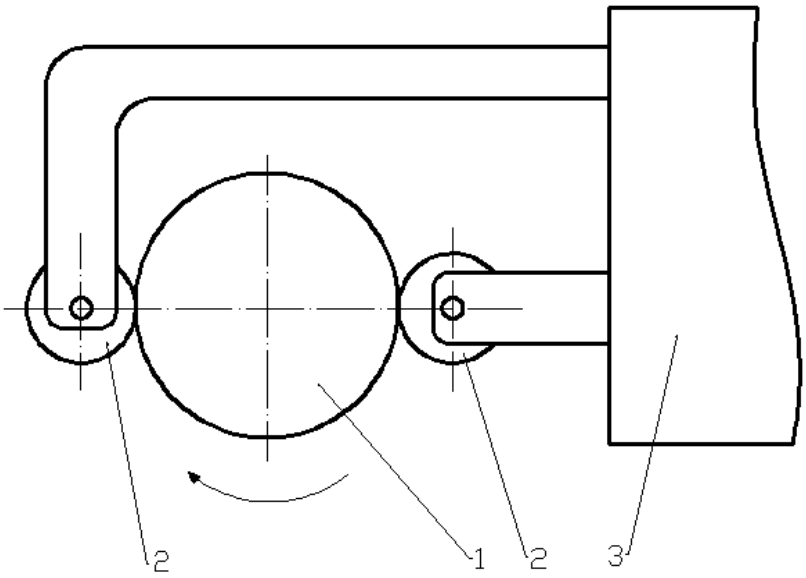
Рисунок 5.7 – Автоматизированное устройство для контроля и сортировки цилиндрических деталей [57]

Основные узлы автоматизированного устройства для контроля цилиндрических деталей (рис. 5.7):

1 – станина,
2 – передний поводковый центр,
3 – пневмоцилиндр,
4 – задний центр с пружиной,
5 – манипулирующее устройство (соленоид;
6 – датчик для измерения отклонения по диаметру и кривизны валов;
7 – электродвигатель;
8 – червячный редуктор;
9 – кривошип;
10 – ременная передача;
11 – цепная передача;
12 – приемный бункер;
13 – воздушный трубопровод;
14 – транспортный канал;
15 – загрузочный бункер;
16 – цилиндрическая деталь;
17 – блок управления.

В работе [57] представлена конкретная кинематическая схема автоматизированного устройства для контроля и сортировки цилиндрических деталей. Использование автоматизированного устройства для контроля и сортировки цилиндрических деталей позволяет с высокой точностью определить отклонение по кривизне цилиндрической детали с минимальными потерями времени. Конструкция устройства разработана так, что происходит самопроизвольное разделение деталей при работе захватывающего приспособления, для поштучного контроля. Данное автоматизированное устройство представляет собой компактную, достаточно простую конструкцию не сложную в изготовлении.

На автоматизированном устройстве можно дополнить вращающимися роликами, датчиками (рис. 5.8), аналого-цифровым преобразователем и подключить к компьютеру. С помощью специальной компьютерной программы будет управлять настройкой датчиков и процессом контроля и сортировки.

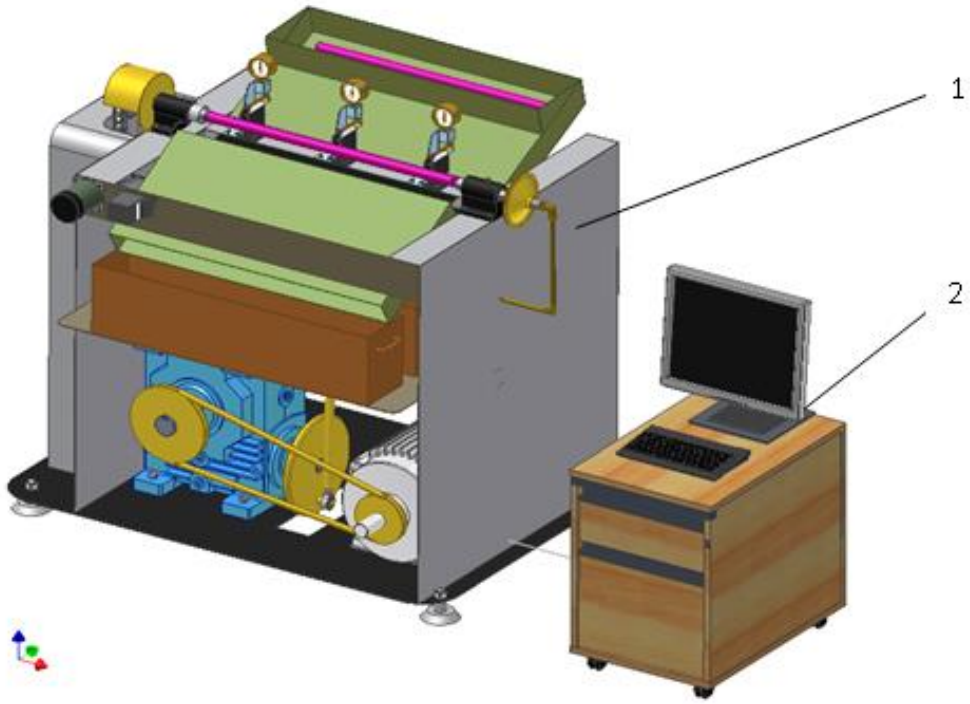


1 – деталь, 2 – вращающийся ролик, 3 – измерительные датчики

Рисунок 5.8 – Схема установки дополнительного ролика и датчика

Автоматизированное устройство позволит быстро получить полную информацию о геометрических характеристиках поперечных сечений цилиндрических деталей, а в будущем эти данные можно использовать для сборочных операций.

Автоматизированное устройство, подключенное к компьютеру, работает следующим образом: после загрузки партии деталей, включается контролирующее устройство и компьютер (рис. 5.9). Компьютерная программа управляет процессом настройки измерительных датчиков и подает сигнал на вращение электродвигателя для подачи деталей на контроль. Анализируя полученную информацию после контроля, компьютер при помощи сигналов управляет процессом сортировки. Устройство позволяет контролировать и форму поперечного сечения детали.



1 – устройство для контроля, 2 – компьютер

Рисунок 5.9 – Автоматизированное устройство для контроля нежестких цилиндрических деталей

На жестком диске компьютера записывает в файлы информацию о координатах контрольных точек на наружной поверхности измеряемой детали. Далее запускают программу обработки результатов замеров и получают геометрические характеристики сечения, которые сравниваются с допускаемыми значениями. Информация о сечениях измеренных цилиндрических деталей хранится в компьютере и в дальнейшем может использоваться на операциях адресной сборки.

С помощью автоматизированного устройства, оно позволяет значительно ускорить и повысить точность контрольных операций, а также улучшить качество сборки соединений с использованием информации о геометрических параметрах измеряемых деталей. Полный контроль деталей при наличии маркировки позволит в дальнейшем использовать их для адресной сборки изделий.

Выводы по главе 5

1. Результаты исследования износостойкости выправленных деталей показали, что максимальная износостойкость наблюдается у деталей, выправленных поперечной обкаткой гладкими плитами, а минимальная – у деталей, после правки упругопластическим изгибом. Износостойкость деталей после правки ППД гладкими плитами, увеличивается почти в 2 раза.

2. Результаты исследования геометрической стабильности показали, что при поперечной обкатке гладкими плитами геометрическая стабильность цилиндрических деталей значительно больше, чем при правке упругопластическим изгибом или растяжением. Так, после правки цилиндра (D = 10 мм, L = 200 мм, $f_{исх}$ = 0,5 мм, ΔH = 0,15 мм) из стали 45 и последующей выдержки в течение 360 суток в термоконстантном шкафу при температуре 20°C, установлено, что у образцов, подвергнутых правке ППД гладкими плитами, отклонение от прямолинейности оси валов (f_o) составило в среднем 15 мкм, у образцов после правки растяжением f_o составило в среднем 98 мкм и после правки образцов упругопластическим изгибом f_o составило в среднем 283 мкм.

3. По результатам экспериментальных исследований установлены следующие рациональные параметры процесса ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами: коэффициент изгиба находятся в диапазоне 5,3-5,5 (при *l/L = 0,7)*; значения степени относительного обжатия Q находятся в диапазоне 0,7-2,5%; число оборотов заготовки составляет 3-5 оборотов; шероховатость плит находится в диапазоне Ra = 0,08-0,16 мкм, угол захвата заготовки и угол для выхода заготовки находятся в диапазоне 2-8^o; ско-

рость поперечной обкатки составляет 0,5-5 м/мин; не рекомендуется использовать технологическую смазку при ППД гладкими плитами.

4. Для повышения производительности процесса ППД выправленных нежестких деталей, основанного на использовании поперечного изгиба и последующей обработки цилиндрической поверхности поперечной обкаткой гладкими плитами в ИРНИТУ, спроектирован и запатентован автоматизированный комплекс для стабилизированной правки нежестких цилиндрических деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке технологии ППД поперечной обкаткой гладкими плитами нежестких цилиндрических деталей после правки изгибом. Решена актуальная научно-техническая задача, направленная на обеспечение геометрической стабильности и повышение качества деталей типа валов и осей. В результате исследований получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработан способ ППД выправленных цилиндрических деталей, основанный на поперечной обкатке гладкими плитами, позволяющий обеспечить формирование равновесных остаточных напряжений и повысить геометрическую стабильность деталей. Способ защищен патентами РФ (№ 2685826 и № 2686963).

2. Разработана геометрическая модель процесса ППД и использован математический аппарат, основанный на законах теории упругопластического течения твердого тела, позволяющие определить основные параметры ППД, напряженное состояние, зоны распределения пластической деформации и остаточные напряжения в деталях после поперечной обкатки гладкими плитами. Установлены условия выполнения процесса ППД: интервал углов клиновых участков рабочих плит (от 2° до 8°) и диапазон степени относительного обжатия Q ($0<Q<4{,}3\%$). Полученные режимы обеспечивают реализацию процесса поперечной обкатки без проскальзывания в зоне обработки и формирование растягивающих напряжений, исключающих разрушение центральной зоны цилиндрических деталей.

3. Результаты конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований показали, что после правки поперечным изгибом формируются неравновесные остаточные напряжения по всему объему заготовки. После поперечной обкатки гладкими плитами формируются равновесные остаточные напряжения, как по длине, так и по поперечному сечению заготовки. Полученные результаты подтверждают техническую идею работы по повышению геометриче-

ской стабильности цилиндрических деталей за счет формирование равновесных остаточных напряжений в объеме тела.

4. Проведены экспериментальные исследования по оценке качества выправленных деталей после ППД. Так, при выправлении цилиндрических деталей из стали 45 со степенью относительного обжатия Q = 1.5% получено: максимальное отклонение от круглости снижается на 39%, максимальный остаточный прогиб практически был полностью устранен (на 98,8%), параметр шероховатости Ra снижается в 16 раз, микротвердость на поверхности детали повышается на 34%, формируются равновесные сжимающие тангенциальные (-298 МПа) и осевые остаточные напряжения (-270 МПа) в поверхностных слоях. Таким образом, разработанный способ ППД позволяет обеспечить не только высокую геометрическую точность цилиндрических деталей, стабильность формы и размеров, но и высокое качество поверхностного слоя.

5. Выполнено сопоставление геометрической стабильности нежестких цилиндрических деталей после правки ППД гладкими плитами, упругопластическим изгибом и растяжением. У образцов, подвергнутых правке и последующей обкатке гладкими плитами, отклонение от прямолинейности оси валов (f_o) составило в среднем 15 мкм, у образцов после правки растяжением f_o = 98 мкм, а после правки образцов упругопластическим изгибом f_o = 283 мкм. Таким образом, экспериментально доказано, что при правке изгибом с последующей поперечной обкаткой гладкими плитами геометрическая стабильность цилиндрических деталей значительно выше, чем при правке упругопластическим изгибом или растяжением.

6. Установлены рациональные параметры процесса ППД поперечной обкаткой гладкими плитами нежестких цилиндрических деталей после правки изгибом: коэффициент изгиба находится в интервале 5,3-5,5 (при *l/L = 0,7)*; значения степени относительного обжатия Q находятся в диапазоне 0,7-2,5%; число оборотов заготовки составляет от 3 до 5; шероховатость рабочих плит находится в диапазоне Ra = 0,08-0,16 мкм; скорость поперечной обкатки составляет 0,5-5 м/мин и не рекомендуется использовать технологическую смазку при ППД. Полученные параметры и режимы ППД рекомендуются к использованию в заводских условиях.

7. Экспериментально установлено, что максимальная износостойкость наблюдается у деталей после ППД гладкими плитами, а минимальная – у деталей, после правки упругопластическим изгибом. Износостойкость деталей после ППД гладкими плитами увеличивается почти в 2 раза, что повышает ресурс технических изделий.

8. Спроектировано и изготовлено опытно-промышленное технологическое оснащение для ППД нежестких цилиндрических деталей после правки изгибом. Разработан автоматизированный комплекс, позволяющий повысить производительность технологических операций и качество деталей машин. Устройство защищено патентом РФ (№2696988).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 1227285 СССР, МКИ[3] В 21 D 3/16. Способ правки искривленного вала / И. В. Кудрявцев, Р. Е. Грудякая, А.П. Деметер (СССР). №3739341/25-27; заявл. 11.05.84; опубл. 30.04.86, бюл. № 16. – 2с.
2. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под. общ. ред. Д. Г. Красковского. – М: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
3. Батищев А.Н., Голубев И.Г., Лялякин В.П. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники. – М. : Информагротех, 1995. – 295с.
4. Беляев Г. С. Технология производства валов / Г. С. Беляев, П. И. Табачников. – Л: Машгиз, 1961. – 252 с.
5. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1963. – 235 с.
6. Бойко Н.И. Ресурсосберегающие технологии повышения качества поверхностных слоев деталей машин. – М. : Маршрут. 2006. – 198 с.
7. Бронз Л. Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. – М. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
8. Брэгг Лоуренс, Храмов Ю. А. Физики: Биографический справочник / Под ред. А. И. Ахиезера. Изд. 2-е, испр. и дополн. – М. : Наука, 1983. – 400 с.
9. Бубнов А.С. Технологические возможности процесса правки маложестких цилиндрических деталей стесненным сжатием // Вестник ИрГТУ. – 2006. – № 4. – С. 68-75.
10. Букатый С. А., Дмитриев В. А., Папшев Д. Д. Оптимизация режимовупрочнения по допускаемым деформациям деталей // Вестник машиностроения. – 1990. – №8. – С. 58-61.
11. Васильевых Л.А. Интенсификация процессов обработки нежёстких деталей / Л.А. Васильевых. Иркутск: Изд-во Ирк. ун-та, 1990. – 280 с.
12. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М. : Металлургия, 1989. – 254 с.

13. Глухов В.В. Организация прокатного производства / В.В. Глухов. – СПб.: изд-во «Лань», 2001. – 368 с.
14. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения : Издательство стандартов, 1981. – 59 с.
15. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов. – М. : Металлургиздат, 1978. – 360 с.
16. Грудев А.П. Теория прокатки. Изд. 2-е, перераб. И доп. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
17. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М. : Машиностроение, 1975. – 223 с.
18. Драпкин Б. М., Кононенко В. К., Безъязычный В. Ф. Свойства сплавов в экстремальном состоянии. – М. : Машиностроение, 2004. – 256с.
19. Емельянов В.Н., Васильев П.Г., Олисов В.Н. Правка прямых валов поверхностным пластическим деформированием // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2014. – №2. – С. 92-97.
20. Емельянов, В. Н. Новые устройства для правки валов с прямолинейной осью / В.Н. Емельянов // Технология машиностроения. – 1995. – № 2. – С. 55-57.
21. Емельянов, В.Н. Прецизионная правка валов поверхностным пластическим деформированием / В.Н. Емельянов // Машиностроитель. – 2001. – №1. – С. 9-10.
22. Жарений И.М., Баршай И.Л., Свидунович Н.А., Спиридонов Н.В. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин. – Мн. : Выш. шк., 2005. – 299 с.
23. Зайдес С. А., Мураткин Г. В. Упрочнение, восстановление, правка валов: Учебное пособие / Под ред. С. А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. – 336с.
24. Зайдес С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла / С.А. Зайдес. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 1992. – 200 с.
25. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. / С.А. Зайдес. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. – 312 с.

26. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Методы определения остаточного напряженного состояния при правке маложестких цилиндрических деталей поперечным изгибом // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2018. – С. 140-147.
27. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Определение зоны пластической деформации маложестких цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами // Инновационные технологии в металлообработке: сб. трудов I Междунар. науч.-практ. конф. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2018. – С. 11-16.
28. Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг. Аналитический расчет остаточных напряжений при упрочнении цилиндрических деталей поперечной обкаткой // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 12. –С. 40-46.
29. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Аналитический расчет основных параметров процесса правки маложестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами // Вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22. – № 3. – С. 24-34.
30. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка напряженного состояния цилиндрических деталей при поперечной правке. Технология металлов. – 2019. – №2. – С. 18-22.
31. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Правка маложестких цилиндрических деталей. Часть 1. Обоснование вида нагружения и режимов при поперечной правке цилиндрических деталей. Известия вузов. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 7. – С. 517-524.
32. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Правка маложестких цилиндрических деталей. Часть 2. Напряженное состояние цилиндрических заготовок при поперечной обкатке плоскими плитами. Известия вузов. Черная металлургия. – 2019. – №9. – С. 674-680.
33. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Стабилизированная правка цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – №8. – С. 3-9.

34. Заявка 2003103717 РФ, МПК[7] C 21 D 9/06. Способ термической правки изделий / Ширяев Д. Ю., Кругликов В. П., Добулевич В.М., Федотов В. А. (РФ) ; заявитель ФГУП ПО "Электрохимический завод".; № 2003103717/02 ; заявл. 07.02.03 ; опубл. 20.09.04, бюл. № 2. – 5 с. : ил.
35. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. – М. : Физматлит, 2001. – 704 с.
36. Корбин М. М., Дехтярь Л. И. Определение внутренних напряжений в цилиндрических деталях. – М. : Машиностроение, 1965. – 175 с.
37. Королев А.В., Балаев А.Ф., Савран С.А. Математическая модель вибромеханической стабилизации геометрических параметров длинномерных деталей // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 2. – №7. – С. 73-76.
38. Коцюбинский О.Ю. Правка растяжением стальных заготовок типа стержней / О.Ю. Коцюбинский, Р.С. Творогова, Е.Э. Рубина // Станки и инструмент. – 1976. – №5. – С. 34-35.
39. Кувалдин Ю. И., Васильевых Л. А. Изменение пространственных погрешностей валов при термической обработке.// Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1987. – №9. – С. 111-115.
40. Кузнецова Е.В., Горбач О.Н., Кузнецов Р.В., Мелехин А.Ю., Горбач К.В. Влияние технологических параметров изготовления на уровень остаточных напряжений в оболочках тепловыделяющих элементов // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 4. – С. 118-131.
41. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
42. Лэ Хонг Куанг, Зайдес С.А. Аналитическое определение напряженного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами // Вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22. – № 9. – С. 50-66.
43. Лэ Хонг Куанг, С.А. Зайдес, Нгуен Ван Кань. Разработка эффективного способа правки маложестких цилиндрических деталей// Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докл.

VIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2019. – С. 7-14.

44. Макаревич, С.С. Остаточные напряжения / С.С. Макаревич, Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 352 с.
45. Максимов Е.А., Устиновский Е.П. Методика расчета технологических параметров правки и мощности главного привода листовой роликовой правильной машины // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2017. – №1(8). – С. 60-67.
46. Манило И.И. Повышение точности ориентации валов с дефектами поверхности при их правке на прессах / И.И. Манило, С.Г. Тютрин, А.А. Городских и др. // Инновации и исследования в транспортном комплексе: материалы первой междунар. научн. – практ конф – Курган: Российская транспортная академия. – 2013. – С. 86-87.
47. Матяш В. И. Математическое моделирование формообразования деталей класса нежестких валов / В.В. Максимов, А.В. Анкин, В.И. Матяш // Вестник машиностроения. – 1997. – №3. – С. 27-30.
48. Мошнин Е. Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. – М. : Машиностроение, 1959. – 242с.
49. Мошнин Е. Н. Гибочные и правильные машины. – М. : Машиностроение, 1956. – 180 с.
50. Мураткин Г. В. Исследование влияния методов правки на размерную стабильность длинномерных валов ответственного назначения // Новые материалы и технологии производства. – 2014. – №4(82). – С. 37-44.
51. Мураткин Г.В., Катова И.В. Математическая модель процесса правки деталей методом поверхностного пластического деформирования с предварительным изгибом заготовки.// Обработка металлов давлением. – 2004. – №6. – С. 27-31.
52. Няшин Ю.И. Исследование способов снижения остаточных напряжений в горячекатаных профилях / Ю.И. Няшин // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – С. 112-114.

53. Овсеенко А. Н. Технологические начальные напряжения и методы их определения. – М. : Труды ЦНИИТМАШ, 1986. – № 196. – С. 9-15
54. Овсеенко А. Н. Технологические основы методов снижения остаточных деформаций и обеспечния качества обработки высоконагруженных деталей энергомашин: Автореферат дис. Докт. Техн. Наук. Москва, 1985. – 32 с.
55. Пат. 2078631 РФ, МПК[7] B 21 D 3/00. Способ правки длинномерных заготовок / Богатырев В.В., Бычков Н.А., Лебедев И.С., Сократов С.В. Шендеров И.Б. ; заявитель и патентообладатель АО "Пермский научно-исследовательский технологический институт. № 94016511/08; заявл. 20.04.00; опубл. 27.09.02, Бюл. №3.
56. Пат. 2096111 РФ, МПК[7] B 21 D 3/16. Способ правки длинномерных деталей / Шендеров И.Б., Соколов А.В., Вяткин М.Д., Беззубов А.В., Пыхов С.И., Козловский А.М., Федорин В.Р. ; заявитель и патентообладатель Научно-призводственное предприятие "ПИКА", АО "УралЛУКтрубмаш". № 95118017/02 ; заявл. 24.10.95; опубл. 20.10.97. Бюл. №7.
57. Патент № 2218260, Российская Федерация, МПК-B23Q 7/12, B07C 5/04. Автомат для контроля и сортировки цилиндрических деталей / Зайдес С.А., Бубнов А.С.. № 2018121267; заяввл. 08.06.2018, опубл. 10.12.2003. Бюл. № 34.
58. Патент № 2685826, Российская Федерация, МПК-B21D 3/16. Способ правки маложестких цилиндрических деталей / Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. № 2018117414; заяввл. 10.05.2018, опубл. 23.04.2019. Бюл. № 12.
59. Патент № 2686963, Российская Федерация, МПК-B21D 9/04. Способ правки цилиндрических деталей / Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. № 2018121267; заяввл. 08.06.2018, опубл. 06.05.2019. Бюл. № 13.
60. Патент № 2696988, Российская Федерация, МПК-B21D 3/00. Устройство для правки нежестких цилиндрических деталей гладкими плитами / Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. № 2019109584; заяввл. 02.04.2019, опубл. 08.08.2019. Бюл. № 22
61. Подпоркин В. Г. Обработка нежёстких деталей / Г.В. Подпоркин. – М. : Машгиз, 1959. – 208с.

62. Полетаев В.А., Третьякова Н.В., Карамов И.А. Исследование деталей электронасосов, упрочненных металлизацией, на износостойкость // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 3. – С. 56-58.
63. Попова В.В. Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка. Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт. – 2013. – 98 с.
64. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. – М. : Машиностроение. – 2003. – 384 с.
65. Рентгеновский анализатор остаточных напряжений *Xstress 3000 G3/G3R.* [Электронный ресурс] URL: https://www.sintrol.ru/images/Brochures_ru/Брошюра_о_Xstress_3000_G3_G3R.pdf
66. Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин. – М. : Высш. Шк, 1974. – 206 с.
67. Рокотян С.Е. Теория прокатки и качества металла. – М. : Металлургия, 1981. – 223 с.
68. Романова О.Г., Драчев А.О. Расчет технологических режимов при холодной правке валов изгибом. Известия ВолгГТУ. – 2008. – Т. 4. – №9 (47). – С. 99-102.
69. Саушкин М. Н., Радченко В. П., Павлов В. Ф. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т 52. – №2. – С. 173-182.
70. Сахненко В. Л. Холодная гибка и правка деталей / В.Л. Сахненко. – М. : Машгиз, 1951. – 108с.
71. Слоним А. З. Правка листового и сортового металла / Слоним А. З., Сонин А.Л. – М: Металлургия, 1981. – 232 с.
72. Смирнов В.С. и др. Поперечная прокатка в машиностроении. – Москва; Ленинград: МАШГИЗ, 1957. – 376 с.

73. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М. : Металлургия, 1981. – 96 с.
74. Способ холодной правки деталей типа вала: А. С. 1159681 (СССР). Опубл. В Б. И./Кудрявцев И. В., Кудрявцев П. И., Грудская Р. Е., Савина Н. М. 1985. №21.
75. Справочник по сопротивлению материалов. / Под. Ред. Н.М Беляева. – М. : Наука, 1976. – 607с.
76. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. – М. : Наука, 2003. – 354 с.
77. Терещенко А.В. Влияние микрогеометрии поверхности на ее износостойкость - планирование эксперимента // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 48. – С. 108-112.
78. Терещенко А.В. Влияние микрогеометрии поверхности на ее износостойкость - планирование эксперимента // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 48. – С. 108-112.
79. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.
80. Устройство для правки с одновременным накатыванием деталей типа вала: А.С. 1682149 (СССР). Опубл. в Б.И./ Емельянов В.Н., Усачев В.П. 1991. – № 37.
81. Фам Дак Фыонг, Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 4. – С. 48-52.
82. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2 ч. / Я.Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. 1 ч. – 472 с.
83. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов: В 2 ч. / Я.Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. 2 ч. – 308 с.
84. Хватов Б.Н. Влияние параметров состояния поверхостного слоя на коррозионно-усталостную прочность лопастей гидротурбин и выбор метода

их окончательной обработки // Вестник тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11. – № 3. – С. 738-745.

85. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. – М. : Машиностроение, 1974. – 254 с.
86. Чепа П.А., Андрияшин В.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей. – Минск : Наука и техника, 1988. – 192 с.
87. Шендеров И. Б. Моделирование и анализ технологии правки длинномерных деталей и заготовок плоским изгибом / И.Б. Шендеров // Вестник машиностроения. – 2000. – №5. – С.51-55.
88. Шендеров И. Б. Моделирование и оптимизация технологического цикла правка – термообработка длинномерных заготовок / И.Б. Шендеров // Вестник машиностроения. – 1997. – № 4. – С. 35- 38.
89. Ящерицын П.И. Упрочняющая обработка нежёстких деталей в машиностроении / Ящерицын П.И., Минаков А.П. – Минск: Наука и техника, 1986. – 215 с.
90. Alexander Metel, Semen Zaides, Nikolaj Bobrovskij, Fam Dak Fong, Olesja Levitskih, Le Hong Quang and Aleksey Lukyanov. Evaluation of microgeometry of cylindrical parts after cross-rolling in smooth plates. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 315 (2019) 062027
91. Anna Okunkova, Semen Zaides, Nikolaj Bobrovskij, Le Hong Quang, Khudobin Leonid, Olesja Levitskih and Nicolay Nosov. Modeling the process of straightening low-stiff cylindrical parts by cross-rolling with smooth plates. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 315 (2019) 062025
92. Avent R. R., Mukai D. J., and Robinson P. F, Heat Straightening Rolled Shapes. – Journal of Structural Engineering, July, 2000, USA.
93. Baier W., Zusset A. Straightening technology and machine. – December, 2001, Germany.
94. C. J. Lammi and D. A. Lados. Effects of residual stresses on fatigue crack growth behavior of structural materials: analytical corrections. International Journal of Fatigue. 2008. Vol. 33. No. 7. P. 858-867.

95. D. George, D.J. Smith. The application of the deep-hole technique for measuring residual stresses in auto frettaged tubes. ASME PVP High Pressure Technology 2000; 406: 25- 31.
96. D. George, P.J. Bouchard, D.J. Smith. Evaluation of through wall residual stresses in stainless steel weld repairs. Materials Science Forum 2000; 347-349: 646-51.
97. H.W. Walton. Deflection methods to estimate residual stress. Handbook of residual stress and deformation of steel. ASM International 2002, ISBN: 0-87170-729-2; pp. 89-98.
98. Haghpanah B., Nayed-Hashemi H., Aziri A.V. Elasto-plastic stresses in a functionally graded rotating disk // ASME J. Eng. Mater. Technol. 2012. Vol. 134, iss. 2. (20)
99. Hsiao Suei-Tien Wheel-driving straightener for straightening longitudinal cylindrical member Пат. 4821547 США, МПК[7] B 21 D 3/00. N 138976; Заявл. 29.12.87; Опубл. 18.04.89; НПК 72/93. US.
100. J. Liu, H. Zhu, W. Xu. Analysis of residual stresses in thick aluminum friction stir welded butt joints. Materials and Design 2011; 32(4): 2000-2005.
101. Jaecheol Koh. Siemens NX 10 Design Fundamentals. Publisher: CreateSpace Independent Publishing Platform 2015. – 672 p.
102. Juan Dong, Jeremy Epp, Alexandre da Silva Rocha, Rafael Menezes Nunes, Hans Werner Zoch. Investigation of the Influence Factors on Distortion in Induction-Hardened Steel Shafts Manufactured from Cold-Drawn Rod. Metallurgical and Materials Transac-tions A, pp. 1-12, 25 November 2015.
103. M.B. Prime, M.R. Hill. Residual stress, stress relief, and in homogeneity in aluminum plate. Scr Mater 2002; 46(1): 77-82.
104. M.B. Prime. Cross-Sectional Mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut. Journal of Engineering Materials and Technology 2001; 123(2): 162-168.
105. Marina Zykova, Semen Zaides, Nikolaj Bobrovskij, Le Hong Quang, Olesja Levitskih, Salov Petr and Aleksey Lukyanov. Calculating the process of straighten-

ing low-stiff cylindrical parts by cross-rolling with smooth plates. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 315 (2019) 052044

106. Patent №3823588 USA, B21d 3/02. Method and system for strengthening large diameter shafts by selective cold rolling / J. Ancarrow, R. Harrington. Declared. 19.10.72; published on 16.07.74.
107. Rajesham S., Tak J.C. A study on the surface characteristics of burnished components // Journal of mechanical working technology. 1989. № 20. С. 129 – 138.
108. S. A. Zaides and Le Hong Quang. State of Stress in Cylindrical Parts during Transverse Straightening. Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2019, No. 13, pp. 169-173.
109. S. A. Zaides and Le Hong Quang. Straightening of Relatively Flexible Cylindrical Parts. Part I. Establishing the Loading Conditions in Transverse Straightening. Steel in Translation, 2019. Vol. 49, No. 7, pp. 440-446.
110. S. Nervi S, B.A. Szabó. On the estimation of residual stresses by the crack compliance method. Comput Methods Appl Mech Eng 2007; 196(37–40): 3577–3584.
111. S.F. Estefen, T. Gurova, X. Castello, A. Leontiev. Surface residual stress evaluation in double electrode butt welded steel plates. Materials and Design 2010; 31(3): 1622-1627
112. Semen Zaides, Le Hong Quang, Nikolai Bobrovskij and Pavel Melnikov. Automated complex for stabilized straightening of low-stiff cylindrical parts. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 537 (2019) 022078
113. W. Cao, R. Fathallah, L. Castex. Correlation of Almen arc height with residual stresses in shot peening process. Mater Sci Technol 1995; 11(9): 967–973.
114. W. Cheng, I. Finnie. Residual stress measurement and the slitting method. New York: Springer 2007, ISBN 978-144194241.
115. Zaides, S.A., Van Khuan, N. Influence of parameters of the calibration process on bending stiffness of steel rod. Part 1. Determination of residual stresses in the calibrated rod (2017) Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya, 60 (11), pp. 870-876.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень условных обозначений

l	длина распределения нагрузки;
L	длина заготовки;
D	диаметр обрабатываемой заготовки;
d	диаметр обработанного цилиндрического детали;
$f_{исх}$	величина исходного прогиба;
$f_{исх}(z)$	текущее значение исходного прогиба;
$f_{общ}$	величина общего прогиба;
ξ	коэффициент изгиба;
f_o	отклонение от прямолинейности оси в течение времени;
b	ширина площади контакта;
A	контактная площадь цилиндра с плитами;
y	половина величины абсолютного обжатия;
ΔH	величины абсолютного обжатия;
R	радиус заготовки;
$r_к$	радиус упругого ядра
$F_{изг}$	усилие изгиба вала от давления выступа верхней плиты;
W	осевой момент сопротивления поперечного сечения вала;
I	осевой момент инерции поперечного сечения вала;
F	сила трения;
N	сила реакции плит;
E	модуль упругости материала;
η	коэффициент Пуассона;
μ	коэффициент трения;
P	нормальное усилие, действующее на заготовку;
Q	степень относительного обжатия;
α	угол захвата заготовки;

σ_y	упругое напряжение;
$\sigma_{упр.пл.}$	упругопластическое напряжение;
σ_i	интенсивность напряжения;
$\sigma_i^{раб}$	интенсивность рабочих напряжений;
$\sigma_i^{ост}$	интенсивность остаточных напряжений;
$\sigma_{ост}$	остаточное напряжение;
σ_ρ	радиальное остаточное напряжение;
σ_z	осевое остаточное напряжение;
σ_θ	тангенциальное остаточное напряжение;
$\sigma_т$	предел текучести материала;
ΔD	изменение диаметра деталей;
K	равен $\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т$ для случая энергетической теории предельного состояния;
Ra	шероховатость поверхности;
Wa	волнистость поверхности;
$HV_{0.2}$	микротвердость;
h	глубина наклепа;
λ	длина волны пучка рентгеновских лучей;
γ	угол дифракции лучей;
ε	упругая деформация;
n	число оборотов заготовки;
V	скорость подвижной плиты;
D_o	исходный диаметр образцов до изнашивания;
D_t	диаметр образцов после изнашивания;
U	интенсивность износа;
t	шаг винта;
i	передаточное отношение привода.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Статистическая обработка экспериментальных данных

Для оценки точности экспериментальных данных используется статистическая обработка экспериментальных данных. Последовательность статистической обработки выполняется следующими этапами:

1. Определение среднего арифметического значения $\overline{x}$:

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

где x_i – результат единичного измерения, n – число измерений.

2. Определение средней квадратичной ошибки S:

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

3. Определение значения доверительного интервала *x*. Доверительный интервал – это интервал, в котором находится истинное значение определяемой величины с заданной доверительной вероятностью.

$$\left(\overline{x} - t_{\alpha,k}\frac{S}{\sqrt{n}}\right) < x < \left(\overline{x} + t_{\alpha,k}\frac{S}{\sqrt{n}}\right),$$

где $S/\sqrt{n}$ обозначают через $S_{\overline{x}}$ и называют квадратичной ошибкой среднего арифметического, а $t_{\alpha,k} \cdot S_{\overline{x}} = \varepsilon_{a,k}$ называют абсолютной ошибкой среднего арифметического.

Тогда доверительный интервал выражается формулой:

$$\left(\overline{x} - t_{\alpha,k}S_{\overline{x}}\right) < x < \left(\overline{x} + t_{\alpha,k}S_{\overline{x}}\right)$$

или

$$\left(\overline{x} - \varepsilon_{\alpha,k}\right) < x < \left(\overline{x} + \varepsilon_{\alpha,k}\right),$$

где α – доверительная вероятность (обычно значение α принимают равно 0,95); $t_{\alpha,k}$ – критическое значение t-критерия Стьюдента, которое задается величиной α и число степени свободы k (k = n-1).

4. Определение относительной ошибки $\varepsilon_{\text{отн}}$ по формуле:

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{\varepsilon_{\alpha,k}}{\overline{x}}100\%.$$

Для каждого режима правки проведены по 2 образцам и на каждом образце из стали 45 проведено измерение в трех местах, то есть число измерений при одном режиме n=6. С доверительной вероятностью α = 0,95 и числом степени свободы k=5, по таблице критических значений t-критерия Стьюдента находится теоретическое значение критерия $t_{\alpha,k}$ = 2,571. Для каждого значения обжатия при измерении отклонения от прямолинейности оси проведены по 6 образцам.

Таблица Б.1 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных измерений отклонения от круглости образцов в зависимости от степени относительного обжатия (Q)

Q, %	$\mathbf{x_i}$ ($\Delta_{кр}$, мкм)						$\overline{x}$	$\mathbf{S^2}$	$S_{\overline{x}}$	$\varepsilon_{a=0,95}$	$\varepsilon_{отн}$, %
0,7	24	20	23	19	20	21	21,17	3,77	0,79	2,04	9,62
1,0	21	20	23	17	18	19	19,67	4,67	0,88	2,27	11,52
1,5	17	14	13	15	16	16	15,17	2,17	0,60	1,54	10,18
2,0	14	13	15	14	15	14	14,17	0,57	0,31	0,79	5,58
2,5	12	13	12	13	12	16	13,00	2,40	0,63	1,63	12,50

Таблица Б.2 – Результаты статистической обработки измерения отклонения от прямолинейности оси образцов в зависимости от степени относительного обжатия (Q)

Q, %	$\mathbf{x_i}$ ($\Delta_{пр}$, мкм)						$\overline{x}$	$\mathbf{S^2}$	$S_{\overline{x}}$	$\varepsilon_{a=0,95}$	$\varepsilon_{отн}$, %
0,7	20	15	17	19	20	18	18,17	3,77	0,79	2,04	11,21
1,0	13	10	11	10	12	11	11,17	1,37	0,48	1,23	10,98
1,5	6	7	8	6	7	6	6,67	0,67	0,33	0,86	12,85
2,0	5	4	6	7	5	6	5,50	1,10	0,43	1,10	20,01
2,5	4	4	5	4	3	4	4,00	0,40	0,26	0,66	16,59

Таблица Б.3 – Результаты статистической обработки измерения шероховатости образцов в зависимости от степени относительного обжатия (Q)

Q, %	$\mathbf{x_i}$ (Ra, мкм)						$\overline{x}$	$\mathbf{S^2}$	$S_{\overline{x}}$	$\varepsilon_{a=0,95}$	$\varepsilon_{отн}$, %
0,7	1,33	1,37	1,30	1,29	1,45	1,55	1,3817	0,010177	0,0412	0,1058	7,66
1,0	0,61	0,63	0,61	0,58	0,62	0,61	0,6100	0,000280	0,0068	0,0176	2,88
1,5	0,31	0,41	0,30	0,35	0,29	0,37	0,3383	0,002177	0,0190	0,0490	14,47
2,0	0,27	0,30	0,26	0,32	0,28	0,29	0,2867	0,000467	0,0088	0,0227	7,91
2,5	0,19	0,18	0,20	0,21	0,17	0,19	0,1900	0,000200	0,0058	0,0148	7,81

Таблица Б.4 – Результаты статистической обработки измерения остаточных напряжений образцов в зависимости от степени относительного обжатия (Q)

Q, %	$\mathbf{x_i}$ (σ_z, МПа)						$\overline{x}$	$\mathbf{S^2}$	$S_{\overline{x}}$	$\varepsilon_{a=0,95}$	$\varepsilon_{отн}$, %
0,7	-172	-160	-195	-175	-165	-180	-174,50	151,50	5,02	12,91	7,40
1,0	-209	-215	-220	-200	-225	-212	-213,50	76,30	3,57	9,16	4,29
1,5	-268	-265	-250	-235	-260	-275	-258,83	206,17	5,86	15,06	5,82
2,0	-289	-280	-245	-278	-265	-255	-268,67	277,87	6,81	17,49	6,51
2,5	-323	-330	-315	-319	-331	-345	-327,17	114,57	4,37	11,23	3,43
Q, %	$\mathbf{x_i}$ (σ_θ, МПа)						$\overline{x}$	$\mathbf{S^2}$	$S_{\overline{x}}$	$\varepsilon_{a=0,95}$	$\varepsilon_{отн}$, %
0,7	-263	-255	-287	-257	-267	-261	-265,00	134,40	4,73	12,16	4,59
1,0	-280	-294	-300	-307	-280	-317	-296,33	218,67	6,04	15,51	5,24
1,5	-297	-294	-300	-314	-280	-317	-300,33	185,87	5,57	14,30	4,76
2,0	-348	-350	-355	-330	-288	-320	-331,83	638,57	10,32	26,51	7,99
2,5	-375	-385	-390	-365	-350	-385	-375,00	230,00	6,19	15,91	4,24

Таблица Б.5 – Результаты статистической обработки измерения микротвердости образцов в зависимости от степени относительного обжатия (Q)

Q, %	$\mathbf{x_i}$ ($HV_{0,2мах}$)						$\overline{x}$	$\mathbf{S^2}$	$S_{\overline{x}}$	$\varepsilon_{a=0,95}$	$\varepsilon_{отн}$, %
0,7	233	229	235	230	238	236	233,50	12,30	1,43	3,68	1,58
1,0	257	262	272	256	248	266	260,17	70,57	3,43	8,81	3,39
1,5	283	285	279	290	260	263	276,67	151,47	5,02	12,91	4,67
2,0	315	320	310	299	309	314	311,17	50,97	2,91	7,49	2,41
2,5	336	340	341	330	327	329	333,83	35,77	2,44	6,27	1,88

По таблице Б.1-Б.5 получено максимальное значение относительной ошибки результатов при:

- измерении отклонения от круглости и отклонения от прямолинейности оси не превышает 15;
- измерении шероховатости и микротвердости не превышает 5%;
- измерении остаточных напряжений не превышает 10%.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РАСЧЕТ

ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов научно-исследовательской работы по повышению качества маложестких цилиндрических деталей гладкими плитами, выполненной в Иркутском национальном исследовательском техническом университете.

Для устранения остаточных деформаций оси транспортера (деталь РТ 023.0074) предлагается к внедрению операция правки гладкими плитами.

При включении данной операции в технологический процесс изготовления вала достигается возможность исключения или значительного уменьшения потерь на брак, обусловленный искажением правильной геометрической формы детали и практически полученные равномерные остаточные напряжений.

Основной составляющей экономической эффективности от внедрения операции правки является сокращение количества технологических операций, и экономия от восстановления бракованных деталей.

Внедрение технологии повышения качества нежёстких цилиндрических деталей гладкими плитами исключает или значительно снижает потери из-за брака, сокращает время производства, снижает трудоемкость производства и улучшает качество конвейерных осей. По сравнению с технологическим процессом изготовления осей транспортера используемым на ООО «Нью- Лен-Ойл». Это связано с повышением равномерных остаточных напряжений, что приводит к стабильности геометрической формы осей транспортера при обработке.

Расчеты годового экономического обеспечения эффективности научно-исследовательских работ с использованием методических указаний по определению фактических затрат и экономии на внедрении новой техники на промышленных предприятиях, одобренными решениями научного совета ГКНТ по проблеме «Организация и экономика научно – технических исследований и разработок». Исходные данные и расчет экономического эффекта приведены в таблицах (В.1-В.3).

Таблица В.1

Исходные данные для расчета экономической эффективности внедрения процесса правки маложестких цилиндрических деталей гладкими плитами

№	Наименование исходных данных	Условные обозначения	Единицы измерения	Значение
1	Годовой объем выпуска	N	шт.	500
2	Стоимость материала	См	руб/кг	43
3	Масса заготовки	Мз	кг	0,3
4	Накладные расходы	Рн	%	40
5	Удорожание вследствие брака	$У_Б$	%	130

Таблица В.2

Исходные данные для расчета основной заработной платы производственных рабочих

№	Наименование операции	Разряд	Часовая тарифная ставка Чс, руб/час	Трудоемкость Т, час	Доплата по результа-там работы ЗПрр, %	Районный коэфф-т Кр, %	Дополнит, з/п ЗПд, %
1	Токарная	4 сд.	182,74	0,10	123	160	120
2	Правильная	4 сд.	170,55	0,025			
3	Токарная	4 сд.	182,74	0,05			
4	Правильная	4 сд.	170,55	0,025			
5	Контроль ОТК	3 повр.	152,28	0,03			
6	Фрезерная	3 повр.	182,74	0,10			
7	Термообработка	3 сд.	213,79	0,28			
8	Контроль ОТК	3 повр.	152,28	0,03			
9	Правильная	4 сд.	170,55	0,10			
10	Контроль ОТК	3 повр.	152,28	0,03			
11	Шлифовальная	5 сд.	182,74	0,15			
12	Правильная	4 сд.	170,55	0,10			
13	Контроль ОТК	3 повр.	152,28	0,03			
14	Шлифовальная	5 сд.	182,74	0,10			
15	Контроль ОТК	3 повр.	170,55	0,03			

Таблица В.3

Расчёт производственной себестоимости одной детали

№	Статьи затрат	Условные обозначения	Формула	Затраты, руб	
				По существ, технологии	По предлагаем технологии
1	Сырье и материалы	Цм	Цм=См*Мз/Рн	32,25	32,25
2	Основная з/п производственных рабочих: 1 Токарная 2 Правильная 3 Токарная 4 Правильная 5 Контроль ОТК 6 Фрезерная 7 Термообработка 8 Контроль ОТК 9 Правильная 10 Контроль ОТК 11 Шлифовальная 12 Правильная 13 Контроль ОТК 14 Шлифовальная 15 Контроль ОТК Итого:	ЗПпр	ЗПпр = Т*Чс* *ЗПрр*Кр*ЗПд	 40,45 10,07 21,58 10,07 10,79 43,16 141,37 10,79 40,28 10,79 64,73 40,28 10,79 43,16 12,08 510,38	 40,45 10,07 21,58 10,07 10,79 43,16 141,37 10,79 10,79 64,73 10,79 43,16 12,08 429,83
3	Общепроизводственные расходы	$Р_{оп}$	$Р_{оп}$ = ЗПпр* *2,21	1127,94	949,92
4	Общехозяйственные расходы	$Р_{ох}$	$Р_{ох}$ = ЗПпр* *1,905	972,28	818,82
5	Себестоимость	С	С = Цм + ЗПпр + $Р_{оп}$ + $Р_{ох}$	2642,85	2231,07
6	Себестоимость с учётом брака	$С_Б$	С = С*УБ	3435,70	
7	Итого:			3435,70	2231,07

Себестоимость изготовления партии деталей по существующей технологии:

$C_1 = C * N = 3435,70*500 = 1717850$ руб.

Себестоимость изготовления партии деталей в соответствии спредлагаемой технологией:

$C_2 = C * N = 2231,07*500 = 1115535$ руб.

Таким образом, при внедрении новой технологии повышения качества маложёстких цилиндрических деталей ожидаемый годовой экономический эффект составит: $C = C_1 – C_2 = 1717850 - 1115535 = 602315$ руб.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Копия 3 патентов на изобретение



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2685826

СПОСОБ ПРАВКИ МАЛОЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU)*

Авторы: *Зайдес Семен Азикович (RU),*
Лэ Хонг Куанг (RU)

Заявка № **2018117414**
Приоритет изобретения **10 мая 2018 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **23 апреля 2019 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **10 мая 2038 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2686963

Способ правки цилиндрических деталей

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" "ФГБОУ ВО "ИРНИТУ" (RU)***

Авторы: ***Зайдес Семен Азикович (RU),***
Лэ Хонг Куанг (RU)

Заявка № **2018121267**
Приоритет изобретения **08 июня 2018 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **06 мая 2019 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **08 июня 2038 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2696988

Устройство для правки нежестких цилиндрических деталей гладкими плитами

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (RU)***

Авторы: ***Зайдес Семен Азикович (RU),***
Лэ Хонг Куанг (RU)

Заявка № **2019109584**
Приоритет изобретения **02 апреля 2019 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **08 августа 2019 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **02 апреля 2039 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Копия акта внедрения результатов работы

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе ИРНИТУ

_____ В.В.Смирнов

«15» февраля 2020 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы аспиранта кафедры машиностроительных технологий и материалов Лэ Хонг Куанг

Результаты диссертационного исследования по теме «Повышение качества выправленных нежестких цилиндрических деталей поверхностным пластическим деформированием» выполненного на кафедре машиностроительных технологий и материалов внедрены в учебном процессе по направлению 15.03.01 – Машиностроение на основании решения кафедры (протокол № 3 от 05.11.2019 г.)

Результаты исследования включены в учебные курсы «Технология конструкционных материалов» и «Технология машиностроения». Разработана и изготовлена экспериментальная установка для выполнения лабораторных работ по повышению качества выправленных нежестких цилиндрических деталей поверхностным пластическим деформированием, основанным на поперечной обкатке заготовки гладкими плитами.

Для учебных курсов «Технология машиностроения» и «Технология конструкционных материалов» подготовлен лекционный материал, демонстрирующий новые технологические возможности ППД гладкими плитами для стабилизации, повышения качества и эксплуатационных характеристик выправленных нежестких цилиндрических деталей.

Директор института АМиТ / _____ / Р.Х. Ахатов

Заведующий кафедрой МТМ / _____ / С.А. Зайдес