На правах рукописи

ЛЭ ХОНГ КУАНГ

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫПРАВЛЕННЫХ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск 2020

Работа выполнена на кафедре машиностроительных технологий и материалов ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: **Зайдес Семен Азикович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Официальные оппоненты: **Тамаркин Михаил Аркадьевич,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Кропоткина Елена Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится «25» декабря 2020 г. в 16^{00} часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.003.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск. ул. Энгельса, д. 3, первый учебный корпус, ауд. 223.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта: www.ulstu.ru

Автореферат разослан « » 2020 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, д. 3, к. 222, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.003.02 Н.И. Веткасову: e-mail: vetkasov5252@mail.ru; тел.: (8422) 41-82-47.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н, доцент Н.И. Веткасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном машиностроении создаются все более прочные материалы, происходит закономерное снижение металлоёмкости изделий. Вследствие этого сформировался большой класс нежестких деталей гладкой номенклатуры: валы, оси, ходовые винты, шпиндели станков, штоки гидроцилиндров и т.д. При этом более половины подобных изделий составляют детали типа валов и осей. Эти детали гладко 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 таких деталей образуются разные виды остаточных напряжений. Поэтому геометрические параметры и формы цилиндрических деталей изменяются, то есть они искривляются. Особенно это касается нежестких деталей, у которых длина превышает диаметр в 20 и более раз. До настоящего времени не существует общего решения этой проблемы и продолжаются поиски эффективных технологических методов для стабилизации геометрических параметров и одновременного снятия остаточных напряжений или формирования равновесных остаточных напряжений в процессе изготовления нежестких цилиндрических 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 операций правки. Холодная правка валов на прессах, которая достаточно давно применяется на практике, не дает должного эффекта, так как внутренние напряжения не удается полностью устранить, и они заново распределяются, причем временно, и последующее искривление таких изделий неизбежно. Холодная правка на прессах отрицательно влияет на эксплуатационные показатели качества деталей машин. Поэтому для ответственных деталей холодная правка на прессах категорически запрещена, о чем делается соответствующая запись в технических условиях на изготовление деталей.

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

Цель работы. Разработка технологии поверхностного пластического деформирования обеспечивающей геометрическую стабильность и качество поверхностного слоя нежестких цилиндрических деталей после правки поперечным изгибом.

Научная гипотеза. Геометрическую стабильность и качество поверхностного слоя нежестких цилиндрических деталей после правки поперечным изгибом можно повысить, если сформировать равномерное распределение остаточных напряжений за счет поверхностного пластического деформирования гладкими плитами.

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.

Научная новизна работы:

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 поперечной 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 ре-

шения 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.

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

Для моделирования процесса ППД использована компьютерная программа ANSYS Workbench 19. Программный пакет *Microsoft Excel* и *AutoCAD 13* использованы 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.

Основные положения, выносимые 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° до 8°) 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. Рекомендации по внедрению в производство режимов технологического процесса ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей и конструкцию технологической оснастки.

Достоверность результатов исследований 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).

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.

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 обкатки 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, выводов и положений, выносимых на защиту.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

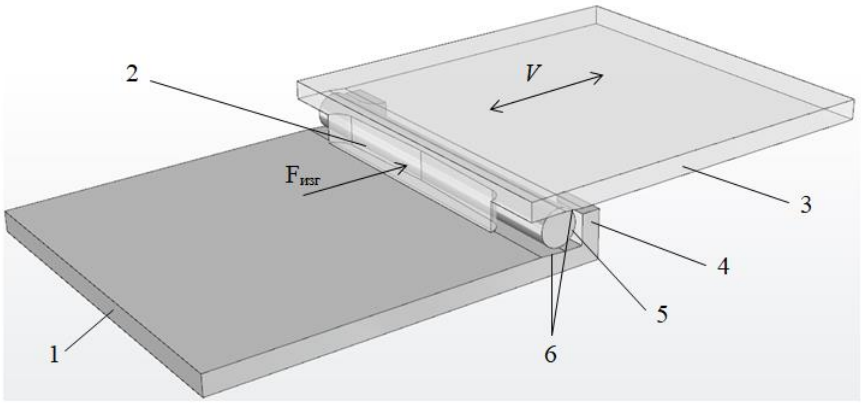
Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены причины искривления нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей. Проанализированы возможности, достоинства и недостатки разных способов правки таких деталей. Большой вклад в развитие теории и технологии правки нежестких цилиндрических деталей внесли отечественные и зарубежные учёные: 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 др. К настоящему времени в области технологии правки получены многие важные результаты. 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. В результате литературного обзора было установлено, что неравномерность и неустойчивость напряженного состояния деталей после правки поперечным изгибом служит ограничением для включения этого процесса при изготовлении особо точных конструкций.

С учетом изложенного была сформулирована цель диссертационной работы, направленная на изучение технологических особенностей процесса ППД гладкими плитами, определение оптимальных параметров процесса ППД, обеспечивающих необходимое качество изделий, выявление границ рационального использования возможностей предлагаемого процесса ППД, проектирование технологического оборудования и оснастки.

Во второй главе изложены результаты аналитического расчета основных параметров процесса ППД и напряженного состояния выправленных цилиндрических деталей при поперечной обкатке гладкими плитами.

Геометрическая модель процесса ППД выправленных цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами представлена на рисунке 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.



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

Рисунок 1 – Геометрическая модель процесса ППД выправленных цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами

Выправление деталей осуществляются в следующей последовательности:

– 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 ($f_{общ}^{max}$). 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.

Чтобы снизить остаточные напряжения и повысить равномерность их распределения в цилиндрических деталях при поперечном изгибе, предложено создавать нагружение воздействием распределённой нагрузки. Получена зависимость предельного общего прогиба от величины исходного прогиба заготовки. Установлено, что правка поперечным изгибом при воздействии распределённой нагрузки на цилиндрический образец с величиной отношения между длиной воздействия распределённой нагрузкой (l) и длиной заготовки (L) $l/L = 0{,}7\text{-}0{,}8$ дает значительно более равномерное распределение остаточных напряжений по длине деталей, чем при действии сосредоточенной поперечной силы. При этом предельные значения коэффициентов изгиба (ξ) находятся в интервале от 5,3 до 5,5. Зависимость между исходным ($f_{исх}$) и общим ($f_{общ}$) прогибом представлена в виде:

$$f_{общ} = \xi \cdot f_{исх}. \quad (1)$$

Максимальное остаточное напряжение $\sigma_{ост}^{max}(z)$ по текущей длине заготовки рассчитается по формуле:

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

где $f_{исх}(z)$ – текущее значение исходного прогиба:

$$f_{\text{исх}}(z) = \frac{4f_{\text{исх}}^{max}}{L}\left(1 - \frac{z}{L}\right)z, \qquad (3)$$

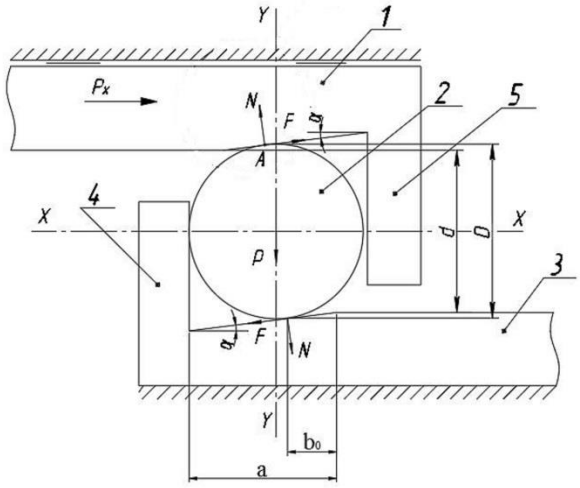
где E – модуль упругости I рода материала; L – общая длина заготовки; D – диаметр заготовки; $f_{\text{исх}}^{max}$ – исходный прогиб в середине заготовки; z – текущая координата по длине заготовки.

Осевые остаточные напряжения по текущему значению координаты y имеют вид:

$$\sigma_z^{\text{ост}}(y) = \begin{cases} \sigma_{\text{ост}}^{max}(z) \cdot \left(1 - \frac{1{,}8y}{0{,}35D}\right) & \text{при } 0 \le y \le 0{,}35D; \\ \sigma_{\text{ост}}^{max}(z) \cdot \left(\frac{1{,}6y - 0{,}8D}{0{,}3D}\right) & \text{при } 0{,}35D \le y \le 0{,}65D; \\ \sigma_{\text{ост}}^{max}(z) \cdot \left(\frac{-1{,}8y + 1{,}45D}{0{,}35D}\right) & \text{при } 0{,}65D \le y \le D, \end{cases} \qquad (4)$$

где y - текущее значение диаметра D ($0 \le y \le D$).

Для реализации процесса ППД гладкими плитами необходимо определить угол захвата заготовки и предельную величину относительного обжатия.



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

Рисунок 2 – Схема захвата заготовки гладкими плитами

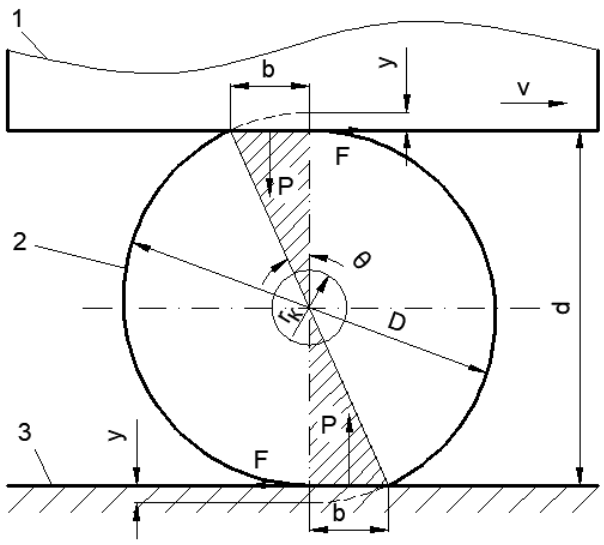
Схема захвата заготовки гладкими плитами показана на рисунке 2. Для реализации процесса поперечной обкатки гладкими плитами нужно обеспечить следующие условия:

– угол подъема заходной части: $\alpha < arctg(\mu)$, (μ – коэффициент трения между заготовкой и плитами);

– 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 (a) от упоров нижней плиты до рабочей части плиты должно быть $a > \frac{D}{2} + \frac{D-d}{2tg\alpha}$.

На рис. 3 показана схема усилий при поперечной обкатке гладкими плитами, из которой видно, что 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 на площадке контакта заготовки с плитами возникают силы трения F, приложенные со стороны плит к заготовке, образуя крутящий момент, приводящий к вращению заготовки.



1 – подвижная плита,
2 – заготовка,
3 – неподвижная плита,
$r_к$ – радиус упругого ядра

Рисунок 3 – Схема усилий при поперечной обкатке гладкими плитами

Определены условия для выполнения процесса ППД нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами: угол подъема заходной части находится в диапазоне от 2° до 8°, максимальное значение абсолютного обжатия $\Delta H = 2y = \frac{2\mu^2 D}{2\mu^2+1}$. Получена зависимость предельного относительного обжатия Q от коэффициента трения μ (Q = $\frac{\Delta H}{D} \cdot 100\%$).

С использованием математического аппарата, основанного на законах теории упругопластического деформирования твердого тела, выполнен аналитический расчет напряженного состояния в цилиндрических деталях при поперечной обкатке гладкими плитами.

Напряженные состояния в пластическом слое при обкатке ($r_к \le \rho \le r$):

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu ln\left(\frac{r}{\rho}\right);\ \frac{\sigma_\theta}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(ln\left(\frac{r}{\rho}\right) - 1\right);$$

$$\frac{\sigma_z}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(ln\left(\frac{r}{\rho}\right) - \frac{1}{2}\right). \quad (5)$$

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

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(n\frac{\rho}{r} - ln(r) - 1\right);\ \frac{\sigma_\theta}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(2n\frac{\rho}{r} - ln(r) - 1\right);$$

$$\frac{\sigma_z}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^a e^{\mu\theta} - \nu\left(\frac{3}{2}n\frac{\rho}{r} - ln(r) - 1\right), \quad (6)$$

где r – радиус заготовки; ρ – текущий радиус заготовки; σ_z – осевое напряжение; σ_ρ – радиальное напряжение, σ_θ – тангенциальное напряжение, $\nu = \pm 1$, $K = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т$ для случая энергетической теории предельного состояния, $\sigma_т$ – предел текучести, $a = \sqrt{1+\mu^2} - 1$, $\theta = arccos\left(1 - \frac{2y}{D}\right)$ (см. рис. 3), $n = \frac{r}{r_к}$, $r_к = r \cdot e^{-\frac{\mu\theta}{\sqrt{1+\mu^2}-1}}$. (7)

Используя метод сложения тензоров напряжений, получены выражения тензора рабочих напряжений вала при поперечной обкатке гладкими плитами после правки изгибом:

$$T_{раб} = \begin{bmatrix} \sigma_\rho & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^{ост}(y) + \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\sigma_z^{ост}(y)$, σ_z, σ_ρ, σ_θ определяются по формулам (2), (5) и (6).

После поперечной обкатки гладкими плитами получены аналитические зависимости для определения остаточных напряжений в пластическом слое цилиндрического тела ($r_к \le \rho \le r$):

$$\frac{\sigma_\rho^0}{K}=\frac{2ln\frac{r}{\rho}-\left[\left(\frac{r_к}{\rho}\right)^2-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2\right]}{2\left[1-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2\right]};\quad \frac{\sigma_\theta^0}{K}=\frac{2ln\frac{r}{\rho}-\left[2-\left(\frac{r_к}{\rho}\right)^2-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2\right]}{2\left[1-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2\right]};$$

$$\frac{\sigma_z^0}{K}=\eta\cdot\left[\frac{2ln\frac{r}{\rho}}{\left[1-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2\right]}-1\right], \qquad (9)$$

где η – коэффициент Пуассона.

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

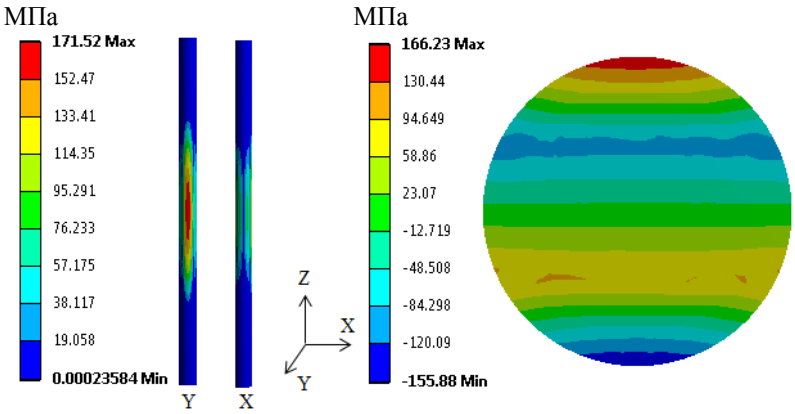
$$\frac{\sigma_\rho^0}{K}=\frac{\sigma_\theta^0}{K}=\frac{ln\frac{r}{r_к}}{1-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2}-\frac{1}{2};\quad \frac{\sigma_z^0}{K}=\eta\cdot\left[\frac{2ln\frac{r}{r_к}}{1-\left(\frac{r_к}{r}\right)^2}-1\right]. \qquad (10)$$

По формулам (7) и (10), при степени относительного обжатия Q < 4,3 % с коэффициентом Пуасона η=0,3 получены растягивающие остаточные напряжения в центральной зоне цилиндра не превышают значения предела текучести материала $\sigma_т$. Поэтому способ ППД поперечной обкаткой гладкими плитами исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области цилиндрических изделий, которое имеет место при обработке с большими обжатиями.

В третьей главе изложено конечно-элементное моделирование процесса ППД и установлено влияние основных параметров поперечной обкатки гладкими плитами на напряженно-деформированное состояние выправленных деталей.

Для численного определения напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в выправленных деталях при поперечной обкатке гладкими плитами построена конечно-элементная модель в виде цилиндра и двух плит в программе ANSYS Workbench 19 (см. схему рис. 1). Использованы следующие геометрические параметры заготовки и плит для моделирования: цилиндр диаметром 10 мм, длиной 200 мм с максимальным начальным прогибом 0,5 мм из стали Ст45 (предел текучести $\sigma_т$ = 360 МПа и модуль упругости E = $2*10^5$ МПа); размер рабочих плит 5x200x210 мм и они считаются абсолютно жесткими.

Режимы обработки: верхняя плита перемещается вправо на 2,65 мм (общий прогиб равен 2,65 мм), далее происходит перемещение плиты в первоначальное положение и происходит выправление заготовки. Далее верхняя плита перемещается влево на 62,83 мм (заготовка поворачивается на 1 оборот) и перемещается вверх на 1 мм (происходит разгрузка). В работе использованы абсолютные обжатия величиной: ΔH = 0,05; 0,07; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4, что соответствует степени относительного обжатия: Q = 0,5; 0,7; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4%.



а) б)

Рисунок 4 – Поля распределения остаточных напряжений после правки деталей поперечным изгибом: а – интенсивность остаточных напряжений, б – осевые остаточные напряжения в поперечном сечении (в середине вала).

На рис. 4 показаны поля распределения 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, основанного на поперечной обкатке гладкими плитами.

На рис. 5 показаны поля распределения остаточных напряжений после поперечной обкатки при величине абсолютного обжатия ΔH = 0,15 мм. В результате расчетов установлено, что после поперечной обкатки гладкими плитами формируются равновесные остаточные напряжения, как по длине (рис. 4), так и по поперечному сечению заготовки (рис. 5). Это положительно сказывается на стабильности формы нежестких цилиндрических деталей.

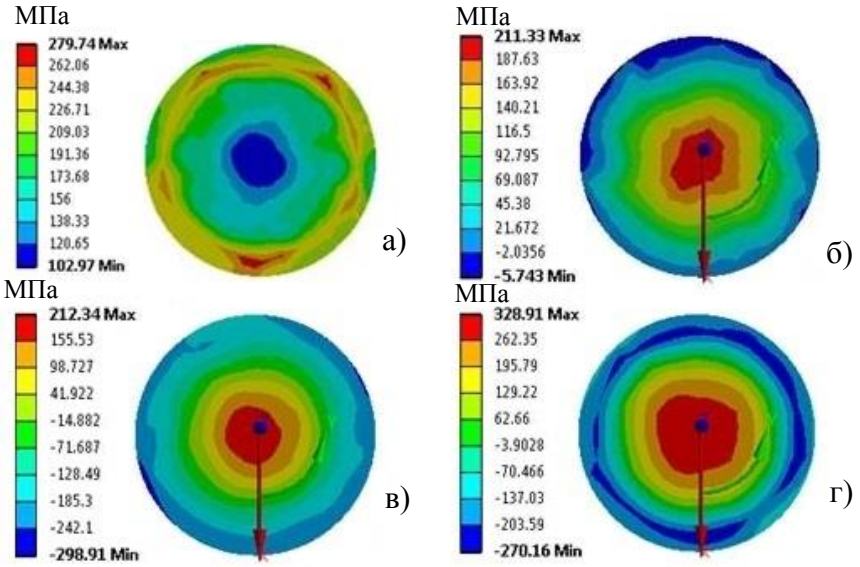
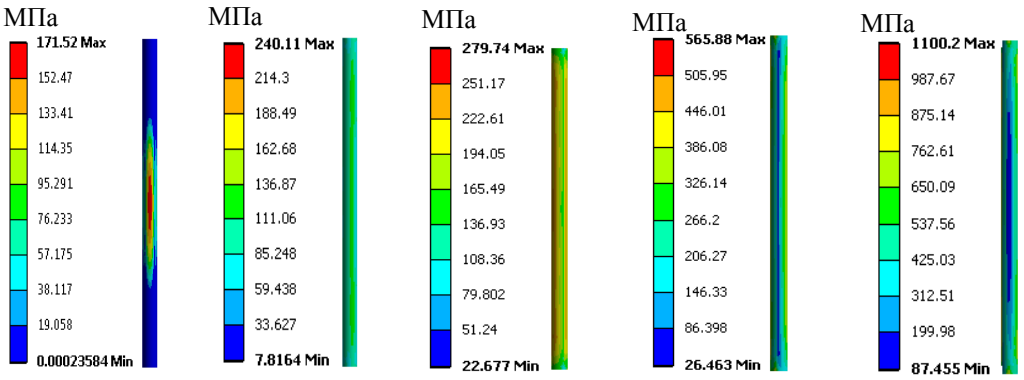


Рисунок 5 – Поля распределения интенсивности и компонентов тензора остаточных напряжений после ППД выправленных цилиндрических деталей гладкими плитами: а – интенсивность остаточных напряжений; б – радиальные напряжения; в – тангенциальные напряжения; г – осевые напряжения

Из рис. 5 следует, что в центральной зоне поперечного сечения заготовки формируются растягивающие остаточные напряжения. Видно что, в каждом слое по сечению цилиндра возникают одинаковые остаточные напряжения. На рисунке 8, а) показано, что интенсивность остаточных напряжений сначала монотонно возрастает 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. 5, б). Распределение тангенциальных и осевых остаточных напряжений происходит по одинаковому закону: формирование в центральной зоне растягивающих напряжений и на поверхности – сжимающих напряжений (см. рис. 5, в, г).

На рисунке 6 показаны некоторые результаты распределения интенсивности остаточных напряжений по длине заготовки при разных значениях абсолютных обжатий после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами. Видно что, при величине абсолютного обжатия меньше 0,05 мм формируется неравномерная интенсивность остаточных напряжений выправленных деталей после ППД (рис. 6 а). При значениях абсолютных обжатий, находящихся в диапазоне 0,07-0,25 мм получено равномерное распределение напряжений. При значениях абсолютного обжатия свыше 0,25 мм на поверхности заготовки происходит разрушение материала (см. рис. 6 д). На рис. 6 г); д) показано, что после ППД максимальное значение интенсивности остаточных напряжений превышает предел текучести, поэтому возможно разрушение материала. Таким образом, рациональное значение абсолютного обжатия при ППД находится в диапазоне ΔH = 0,07-0,25 мм.



а) б) в) г) д)

Рисунок 6 – Поля распределения интенсивности остаточных напряжений по длине выправленных деталей после поперечной обкатки гладкими плитами при ΔH (мм) равном: а) 0,05; б) 0,07; в) 0,15; г) 0,25; д) 0,4

Рассмотрим распределение интенсивности остаточных напряжений по сечению выправленного цилиндра после ППД с рациональными значениями относительных обжатий в интервале Q = 0,7–2,5% (рис. 7). Видно, что интенсивность остаточных напряжений монотонно увеличиваются от центра к периферии цилиндрического образца. Это значит, что пластическое течение при поперечном обжатии эффективно происходит только в поверхностных слоях заготовки. В центральной зоне цилиндров интенсивность напряжения меньше, чем σ_T (в 2,5–6,5 раз).

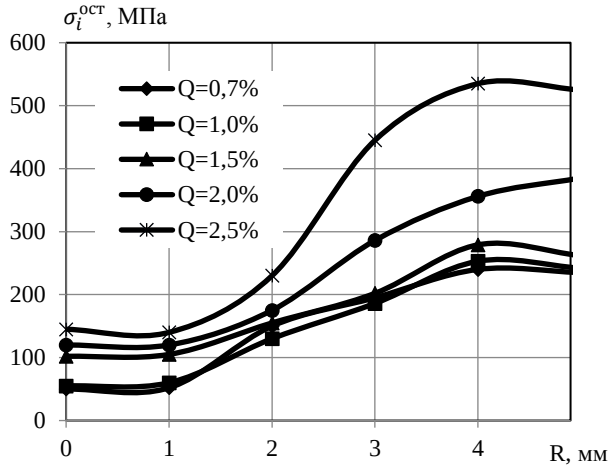


Рисунок 7 – Распределение интенсивности остаточных напряжений по сечению цилиндрического образца

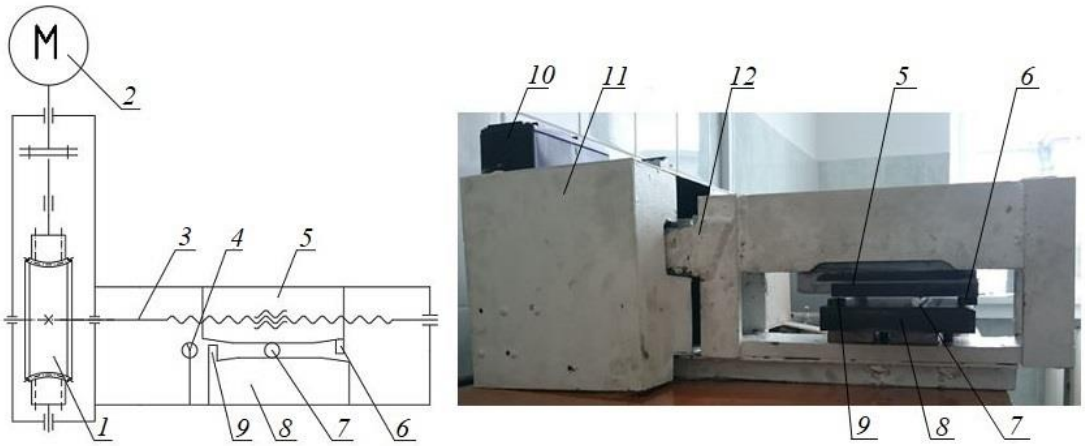
Кроме влияния степени относительного обжатия установлено влияние физико-механических свойств материала на напряженное состояние. Рабочие напряжения в большой степени зависят от предела текучести металла. При повышении предела текучести ($\sigma_т$) и модуля упругости (E) остаточные напряжения возрастают.

В результате конечно-элементного моделирования установлено, что оптимальные режимы ППД поперечной обкаткой гладкими плитами в значительной мере зависят от геометрических параметров и физико-механических свойств обрабатываемых изделий. Режимы ППД должны назначаться конкретно для каждого вида изделия. В этой связи весьма правомерно использование компьютерной программы для расчета оптимальных параметров технологического процесса ППД нежестких цилиндрических деталей.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального определения показателей качества выправленных деталей после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами.

Работа правильно-обкатного станка представлена на рис. 8: вращение от вала электродвигателя 2 передается через червячный редуктор 1 на рабочий винт 3. С помощью резьбового отверстия в подвижной плите 5 вращательное движение винта преобразуется в поступательное, вследствие чего плита 5 перемещается влево на величину общего прогиба,

измеряемого индикатором 4 (т. е. реализуется перегиб заготовки, необходимый для ее выправления). Далее подвижная плита сдвигается вправо (разгрузка) в первоначальное положение, и заготовка принимает прямолинейную форму. После этого плита 5 продолжает перемещаться вправо, реализуя поперечную обкатку обрабатываемой детали 7. Изменение значения абсолютного обжатия осуществляется путем подъема вверх или вниз неподвижной плиты 8. Обратное движение подвижной плиты происходит за счет реверсирования вращения электродвигателя.



а) б)

Рисунок 8 – Экспериментальный правильно-обкатной станок:
а) кинематическая схема; б) общий вид станка;
1 – червячный редуктор; *2* – электродвигатель; *3* – рабочий винт; *4* – индикатор;
5 и *6* – подвижная плита и ее выступ; *7* – обрабатываемая деталь;
8 – неподвижная плита; *9* – упоры нижней плиты; *10* – переключатель;
11 – привод станка (под защитным кожухом); *12* – станина

Экспериментальными исследованиями установлено, что способ ППД нежестких цилиндрических деталей, основанный на использовании поперечной обкатки гладкими плитами, позволяет обеспечить не только высокую геометрическую точность цилиндрических деталей и стабильность формы и размеров, но и высокое качество поверхностного слоя деталей.

После ППД выправленных образцов остаточные напряжения измеряли на рентгеновском анализаторе (дифрактометр) *Xstress 3000 G3.* Остаточные напряжения на обработанной поверхности измеряли в четырех точках по окружности на поверхности каждого сечения (*A-A, B-B, C-C*) (рис. 9) и вычислили среднеарифметические значения. В каждой точке получены остаточные напряжения в двух направлениях: вдоль оси – осевые остаточные напряжения σ_z^0 и поперек оси – тангенциальные остаточные напряжения σ_θ^0.

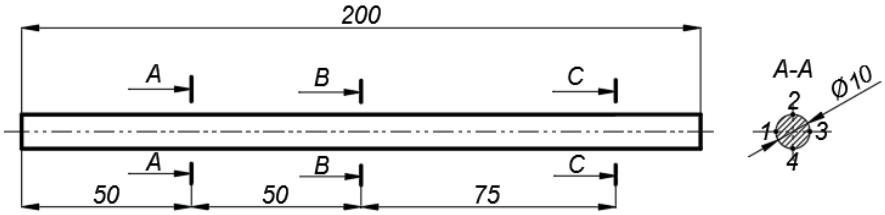


Рисунок 9 – Схема измерения остаточных напряжений

Экспериментально установлено, что после ППД поперечной обкаткой гладкими плитами получены равновесные остаточные напряжения на поверхности выправленных деталей, а в поверхностных слоях формируются сжимающие остаточные напряжения (табл. 2), которые повышают износостойкость, прочность и другие эксплуатационные характеристики деталей машин.

Таблица 1. – Остаточные напряжения на поверхности деталей после правки поперечным изгибом

Точка	Остаточные напряжения, МПа					
	Сечение *A-A*		Сечение *B-B*		Сечение *C-C*	
	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

Таблица 2 – Остаточные напряжения на поверхности выправленных деталей после поперечной обкатки гладкими плитами

Степень относительного обжатия (Q, %)	Остаточные напряжения, МПа					
	Сечение *A-A*		Сечение *B-B*		Сечение *C-C*	
	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

При использовании ППД гладкими плитами происходит некоторое изменение геометрических параметров детали. Так, при выправлении цилиндрического образца (D = 10 мм, L = 200 мм, $f_{исх}^{max} = 0{,}5$ мм, Q = 1,5 %) из стали 45 максимальное отклонение от круглости снижается на 39%, максимальный остаточный прогиб практически был полностью устранен (на 98,8%).

Результаты исследования показали, что ППД гладкими плитами позволяет существенно снизить шероховатость поверхности деталей (рис. 10). Установлено, что при увеличении степени относительного обжатия параметры шероховатости поверхности (высотные и шаговые) деталей уменьшаются. Так, при ППД цилиндра из стали 45 с исходными параметрами шероховатости (Ra = 5 мкм и S_m = 223 мкм) со степенью относительного обжатия Q = 1,5 %, получена шероховатость (Ra = 0,31 мкм и S_m = 157 мкм) которая положительно сказывается на качестве поверхности деталей малой жесткости. Таким образом, при ППД гладкими плитами высотные показатели шероховатости Ra снижаются в 16 раз, а шаговые – на 1,5 раз.

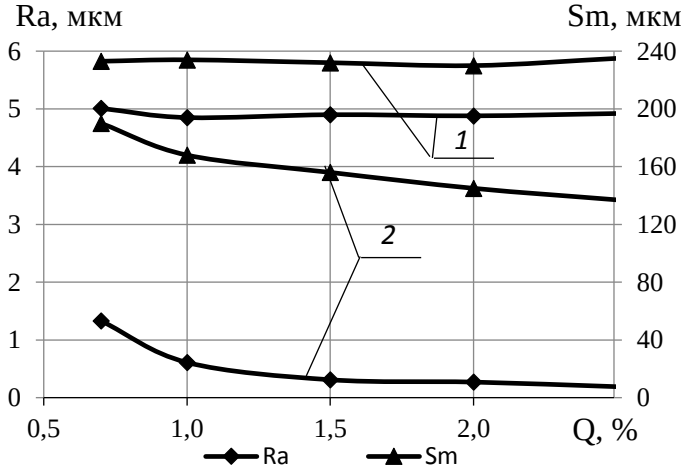


Рисунок 10 – Зависимость шероховатости обкатанной поверхности от степени относительного обжатия (Q): исходная (1) и после ППД (2)

Результаты исследования показали, что при ППД гладкими плитами происходит дробление исходной структуры материала, повышается однородность структуры, формируется более равномерная текстура материала поверхностного слоя, причем микротвердость в поверхностном слое деталей повышается на 30-35%.

Установлено что, при увеличении степени относительного обжатия глубина наклепа возрастает. Результаты экспериментального измерения глубины наклепа деталей несколько меньше (на 15-20%), чем при расчете по компьютерной программе Ansys Workbench. 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.

В пятой главе приведена оценка эксплуатационных характеристик деталей при ППД гладкими плитами, а также изложены технологические рекомендации для ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей.

Результаты экспериментального исследования износостойкости выправленных деталей показали, что максимальная износостойкость наблюдается у деталей после правки изгибом и последующим ППД гладкими плитами, а минимальная – у деталей после правки упругопластическим изгибом. Износостойкость деталей после ППД гладкими плитами увеличивается почти в 2 раза.

Результаты сравнения геометрической стабильности деталей показали, что при правке ППД гладкими плитами размерная стабильность цилиндрических деталей значительно больше, чем при правке упругопластическим изгибом или растяжением (рис. 11). Так, при выправлении цилиндра (D = 10 мм, L = 200 мм, $f_{исх} = 0{,}5$ мм, ΔH = 0,15 мм) из стали 45 в течение 360 суток в термоконстантном шкафу при температуре 20°С установлено, что у образцов, подвергнутых правке гладкими плитами, отклонение от прямолинейности оси валов ($f_о$) составило в среднем 15 мкм, у образцов после правки растяжением $f_о$ = 98 мкм, а после правки образцов упругопластическим изгибом $f_о$ = 283мкм.

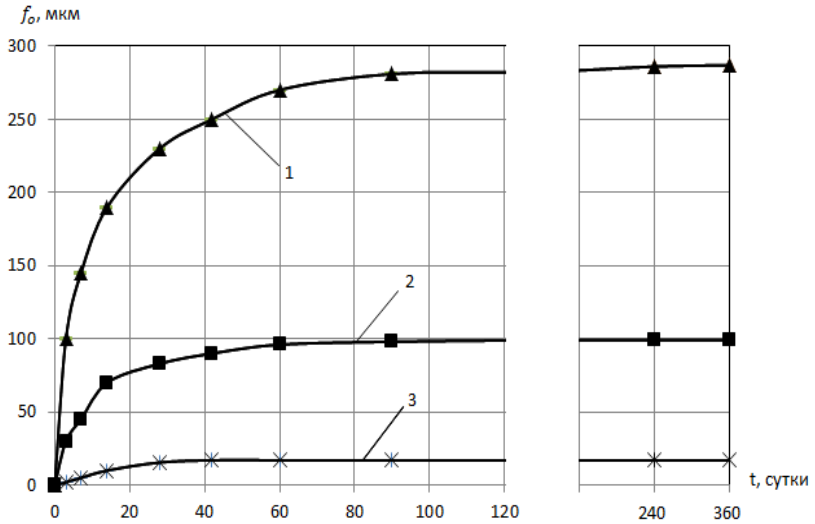


Рисунок 11 – Изменение отклонения от прямолинейности оси с течением времени после правки валов с исходным прогибом $f_{исх} = 0{,}5$ мм:
1 – упругопластическим изгибом;
2 – растяжением;
3 – поперечной обкаткой гладкими плитами

По результатам численных расчетов и экспериментальных исследований установлены следующие рациональные параметры процесса ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами: коэффициент изгиба находятся в интервале 5,3-5,5 (при *l/L = 0,7)*; значения степени относительного обжатия Q находятся в диапазоне 0,75-1,5%; число оборотов заготовки составляет 3-5; шероховатость плит находится в диапазоне Ra = 0,08-0,16 мкм; угол захвата заготовки и угол для выхода заготовки находятся в интервале 2-5°; скорость поперечной обкатки составляет 0,5-5 м/мин и не рекомендуется использовать технологическую смазку при ППД.

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 ППД выправленных нежестких цилиндрических деталей (Патент РФ №2696988). При внедрении новой технологии повышения качества осей транспортера (деталь РТ 023.0074) с годовым объёмом выпуска 500 шт. ожидаемый годовой экономический эффект составит 602315 руб.

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 геометрической 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 с величиной степени 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 поверхностной 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).

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

В изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. 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.

2. **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.

3. Зайдес С.А., **Лэ Хонг Куанг**. Оценка напряженного состояния цилиндрических деталей при поперечной правке. Технология металлов. – 2019. – №2. – С. 23-28.

4. Зайдес С.А., **Лэ Хонг Куанг**. Стабилизированная правка цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – №8. – С. 3-9.

5. Зайдес С.А., **Лэ Хонг Куанг**. Определение качества поверхностного слоя маложестких цилиндрических изделий после правки поперечной обкаткой гладкими плитами. Известия Вузов. Машиностроение. – 2019. – №12. – С. 5-13.

6. Зайдес С.А., **Лэ Хонг Куанг**. Влияние основных параметров процесса правки поперечной обкаткой гладкими плитами на качество цилиндрических деталей. Технология металлов. – 2020. – №2. – С. 37-44.

7. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка качества правки цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами. Вестник машиностроения. – 2020. – №6. – С. 72-76.

В международных изданиях, включенных в международную базу Scopus:

8. 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.

9. S. A. Zaides and **Le Hong Quang**. Straightening of Relatively Flexible Cylindrical Parts. Part II. Stress State of the Cylinder Workpiece in Transverse Rolling between Flat Plates. Steel in Translation. – 2019. – Vol. 49. – No. 9. – Pp. 581-586.

10. S. A. Zaides and **Le Hong Quang**. State of Stress in Cylindrical Parts during Transverse Straightening. Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2019. – No. 13. – Pp. 1487-1491.

11. 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

12. 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

13. 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

14. Marina Zykova, Semen Zaides, Nikolaj Bobrovskij, **Le Hong Quang**, Olesja Levitskih, Salov Petr and Aleksey Lukyanov. Calculating the process of straightening low-stiff cylindrical parts by cross-rolling with smooth plates. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 315 (2019) 052044

15. S A Zaides and **L Kh Kuang**. Improving the quality of aircraft fasteners by transverse running with flat plates. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 632 (2019) 012115

Монография:

16. Зайдес С.А., Емельянов В.Н., Мураткин Г.В., **Лэ Хонг Куанг**. Правка валов поверхностным пластическим деформированием: монография. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. – 403 с.

Патенты:

17. 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.

18. 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.

19. 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.

В прочих изданиях:

20. 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.

21. 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.

22. **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.

23. Зайдес С.А., **Лэ Хонг Куанг**. Определение напряженого состояния после правки маложестких цилиндрических деталей поперечным изгибом // Технико-экономические проблемы развития регионов: материалы научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2019. – С. 38-41.

24. Зайдес С.А., **Лэ Хонг Куанг**. Оценка качества маложестких деталей транспортной техники после правки поперечной обкаткой гладкими плитами. // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ - 2019): сборник статей XI Международной научно-технической конференции – Курск: Изд-во: ЮЗГУ, 2019– С. 90-94.

Подписано в печать . .2020. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Зак. . Поз. плана 2 н.
Отпечатано в типографии Издательства ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83