

*На правах рукописи*



**ХО Минь Куан**

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ДЕТАЛЕЙ МАЯТНИКОВЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ  
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена  
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении  
высшего образования  
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

**Научный руководитель:****Зайдес Семен Азикович**

доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
профессор кафедры материаловедения, сварочных  
и аддитивных технологий (г. Иркутск)

**Официальные оппоненты:****Безъязычный Вячеслав Феоктистович**

доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиацион-  
ный технический университет им. П.А. Соловьева»,  
профессор кафедры технологии авиационных двига-  
телей и общего машиностроения (г. Рыбинск)

**Лебедев Валерий Александрович**

кандидат технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический  
университет»,  
исполняющий обязанности заведующего кафедры  
металлорежущих станков и инструментов (г. Ростов-  
на-Дону)

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный тех-  
нический университет» (г. Новосибирск)

Защита состоится «14» декабря 2023 г. в 09.00 на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу <http://www.istu.edu>.

Автореферат разослан «16» октября 2023 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

Е-mail: [vulix2011@yandex.ru](mailto:vulix2011@yandex.ru)

Тел./факс: (3952) 40-51-17.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.т.н., доцент



Н.В. Вулых

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Вопросы, связанные с повышением качества машиностроительной продукции, относятся к приоритетным задачам машиностроительных отраслей. В последнее время особенно остро встал вопрос о импортозамещении выпускаемой продукции. От ряда металлообрабатывающих отраслей потребовалось создание новых технологий, направленных на повышение качества деталей машин.

Известно, что в машиностроительном производстве поверхностное пластическое деформирование (ППД) является одним из наиболее эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки, применяющихся для повышения качества и улучшения физико-механических свойств поверхности деталей.

Методы ППД при статическом воздействии деформирующего инструмента на заготовку осуществляются двумя способами: обработка по схеме качения и обработка по схеме скольжения рабочего инструмента. При ППД по схеме качения возникает незначительное трение в зоне контакта по сравнению с обработкой скольжением, поэтому напряженное состояние в очаге деформации часто не достигает необходимой степени упрочнения и величины сглаживания микронеровностей поверхностного слоя.

При ППД цилиндрических деталей способом скольжения усложняются условия работы деформирующего инструмента, возникают повышенные силы трения и адгезионного воздействия, что приводит к формированию высоких контактных давлений в зоне деформации даже при небольших величинах нормальных сил. Это вызывает повышение усилия деформирования и температуры в зоне контакта, при этом износостойкость рабочего инструмента резко снижается. Кроме того, упрочнение по схеме скольжения характеризуется повышенной теплосиловой напряженностью из-за большого трения в зоне контакта, что является причиной ухудшения эксплуатационных свойств обработанных деталей.

Таким образом, при механической обработке ППД нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей традиционными способами сложно получить заданное качество деталей, так как высокая радиальная нагрузка от рабочего инструмента приводит к искажению формы детали и не обеспечивает стабильность механических свойств по длине заготовки. Наоборот, если снизить радиальную нагрузку, то сложно получить необходимую степень упрочнения поверхностного слоя при приемлемой производительности процесса.

В связи с этим **актуальным является** необходимость создания нового метода ППД, базирующегося на параллельном комбинировании в едином процессе различных принципов механического взаимодействия (процесс качения и скольжения) деформирующего инструмента с обрабатываемой деталью, обеспечивающего интенсификацию напряженного состояния в очаге деформации, позволяет получить необходимую степень упрочнения при постоянном радиальном натяге и высокое качество поверхностного слоя упрочненных деталей.

**Научная гипотеза:** повышение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации возможно за счет реализации сложной кинематики рабочего инструмента, с помощью которой процесс упрочнения осуществляется путем последовательной комбинации двух процессов: качения и скольжения.

**Целью диссертационной работы** является повышение качества поверхностного слоя нежестких цилиндрических деталей путем интенсификации напряженного состояния в очаге деформации маятниковым поверхностным пластическим деформированием.

### **Задачи работы:**

1. Проанализировать проблемы теории и практики обработки нежестких цилиндрических деталей типа валов, осей, штоков способами скольжения и качения рабочего инструмента. Выявить преимущества и недостатки каждого способа, причины искривления цилиндрических деталей при обработке ППД разными способами и разработать мероприятия по их устранению.

2. Разработать новый способ отделочно-упрочняющей обработки с использованием инструмента в виде кругового сектора, совершающего маятниковое угловое движение от-

носителем своей оси симметрии и в плоскости, перпендикулярной к оси заготовки, который позволяет реализовать процесс упрочнения одновременно по схеме качения и скольжения с обеспечением интенсификации напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в упрочненных деталях без повышения радиального натяга.

3. Построить конечно-элементную модель для маятникового поверхностного пластического деформирования цилиндрических деталей секториальным рабочим инструментом, позволяющую следующее:

- определить напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в готовых изделиях, а также внеконтактную деформацию;

- определить влияние физико-механических свойств материала и основных параметров маятникового ППД на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовки;

- определить температуру в зоне контакта заготовки с секториальным рабочим инструментом, установить ее влияние на процесс пластической деформации и остаточное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя упрочненных деталей.

4. Разработать технологию и инструментальное оснащение для реализации процесса маятникового ППД цилиндрических деталей.

5. Экспериментально определить влияние основных параметров маятникового ППД на показатели качества цилиндрических деталей, скорректировать конечно-элементную модель процесса маятникового ППД. Определить технологические параметры и оптимальные режимы упрочнения, позволяющие получить наилучшие показатели качества деталей машин.

6. Оценить показатели качества деталей, упрочненных маятниковым ППД, и разработать технологические рекомендации по применению предлагаемого способа на производстве.

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые теоретически обоснована возможность создания более сложной кинематической схемы упрочнения поверхностного слоя секториальным рабочим инструментом для интенсификации напряженного состояния очага деформации, базирующейся на комбинации двух процессов: качения и скольжения рабочего инструмента (п. 4 паспорта специальности 2.5.6).

2. Создана конечно-элементная модель маятникового ППД, позволяющая выполнять численные расчеты показателей напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и упрочненного поверхностного слоя. Выявлены законы изменения внеконтактной деформации, а также степени упругой разгрузки металла после окончания упрочнения (п. 3 и 4 паспорта специальности 2.5.6).

3. С использованием шумов Баркгаузена проведены экспериментальные исследования по определению влияния маятникового ППД на формирование сжимающих остаточных напряжений в цилиндрических деталях из стали 45. Установлена математическая зависимость механических напряжений от амплитуды шумов Баркгаузена (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

4. Установлены связи между результатами измерения микротвердости и средними размерами зерна, между шероховатостью и коррозионной стойкостью деталей после маятникового ППД. Разработаны модели регрессии для исследуемых показателей качества упрочненных деталей маятниковым ППД (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

**Теоретическая значимость.** Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей формирования качества поверхностного слоя при интенсификации напряженно-деформированного состояния очага деформации и остаточных напряжений в упрочненных деталях при маятниковом поверхностном пластическом деформировании.

**Практическая значимость.** Разработана технология маятникового ППД с применением секториального рабочего инструмента, обеспечивающая повышение качества цилиндрических деталей машин типа валов и осей. Определены основные технологические параметры и режимы обработки, обеспечивающие эффективность процесса упрочнения маятни-

ковым ППД. Разработаны конструкции технологических устройств для реализации маятникового движения рабочего инструмента. Составлены технологические рекомендации для внедрения предлагаемого способа упрочнения на производстве.

Результаты диссертационной работы рекомендованы для использования в учебном процессе при проведении занятий по дисциплинам «Технология машиностроения», «Отделочно-упрочняющая обработка ППД», а также могут быть полезны аспирантам и научным работникам, занимающихся вопросами ППД.

**Методология и методы исследования.** В работе теоретические исследования выполнены на базе научных основ технологии машиностроения, физики твердого тела, теоретической механики, теории прочности и упругопластической деформации, механики поверхностного пластического деформирования в процессах обработки, теории планирования экспериментов и математической статистики, метода конечно-элементного моделирования.

Для создания конечно-элементной модели использована компьютерная программа ANSYS Workbench 19. Для проведения расчетов, создания графиков и чертежей был использован программный пакет Microsoft Excel и КОМПАС – 3D V11. Для проведения статистической обработки данных, а также регрессионного анализа результатов экспериментов использована программа Statistica 10.1.

Экспериментальные исследования проведены в лабораторных условиях на технологической установке с использованием современных средств и устройств измерения:

- для определения размеров и геометрической точности упрочненных деталей использована портальная координатно-измерительная машина Contura G2 Aktiv;
- для измерения шероховатости и волнистости использован профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200;
- для определения остаточных напряжений в поверхностном слое упрочненных деталей использован анализатор шумов Баркгаузена Rollscan 300 со специальным измерительным стендом CamScan 100-2LD;
- для измерения твердости поверхностного слоя по Роквеллу применяли твердомер HBRV-187,5;
- для измерения микротвердости упрочненных деталей использован микротвердомер HNV-G21;
- для измерения размеров зерен микроструктуры упрочненных деталей использован металлографический микроскоп MET-2;
- для измерения контактной температуры в очаге деформации использован универсальный тепловизор Flir SC7000.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Результаты анализа характеристик новой кинематики процесса маятникового ППД с использованием секториального рабочего инструмента, позволяющей реализовать упрочнение за счет чередования двух процессов качения и скольжения с расширением технологической возможности по интенсификации напряженно-деформированного состояния обрабатываемой заготовки.

- Результаты численных расчетов при моделировании напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей после маятникового воздействия секториальным инструментом. Выявленные внеконтактные деформации и степень упругой разгрузки.

- Результаты оценки показателей качества и эксплуатационных характеристик упрочненных деталей после применения технологии маятникового ППД с использованием новой конструкции рабочего инструмента в виде кругового сектора.

- Результаты множественной регрессии по оптимизации параметров маятникового ППД и технологические рекомендации по выбору геометрических размеров рабочего инструмента и параметров процесса маятникового упрочнения.

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

**Личный вклад автора** заключается в разработке нового способа и технологии упрочнения цилиндрических деталей маятниковым ППД, реализации методики оценки напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей после маятникового ППД в зависимости от основных технологических параметров процесса, проведении экспериментальных исследований, анализе, обработке и интерпретации полученных результатов, представлении основных результатов в виде публикаций, патентов, научных докладов и рукописи диссертации.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, а также на семинарах: XI и XII Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, 2021–2022 г.), II Всероссийской научно-практической конференции «Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции» (г. Омск, октябрь 2021 г.), III и IV Международных научно-практических конференциях «Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология» (г. Якутск, апрель 2021–2022 г.), XXVIII Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, сентябрь 2021 г.); XIII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении 2022» (г. Барнаул, 2022 г.); научном семинаре технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющих и виброволновых технологий» (г. Ростов-на-Дону, 2023 г.), а также на объединенном заседании кафедр Института авиационного машиностроения и транспорта ИРНИТУ (2023 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в виде 22 научных статей в различных научных выходных источниках. Из них в журналах рекомендуемого перечня ВАК РФ – 10 статей, в изданиях, включенных в международную базу Scopus – 5 статей. Получено 4 патента РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 142 наименований. Работа содержит 194 страниц машинописного текста, включая 20 таблиц и 95 рисунков; имеется 5 приложений.

### Краткое содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, основная идея и задачи научного исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены методы исследования и методология, и также основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ результатов отечественных и зарубежных исследований в области отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД), который позволил выявить перспективные направления, установить направления интенсификации режимов и повышения качества поверхностного слоя цилиндрических деталей. Проанализированы возможности, достоинства и недостатки традиционных способов ППД по схеме качения и скольжения рабочего инструмента. Весомый вклад в развитие теории и технологии упрочнения ППД цилиндрических деталей внесли российские и зарубежные ученые: А.П. Бабичев, В.Ф. Безъязычный, В.Ю. Блюменштейн, С.А. Букатый, М.С. Дрозд, В.Н. Емельянов, С.А. Зайдес, А.Н. Исаев, В.П. Кузнецов, В.А. Лебедев, М.М. Матлин, Л.Г. Одинцов, Я.Н. Отений, Д.Д. Папшев, А.Е. Пашков, М.Е. Попов, Х.М. Рахмянов, В.М. Смелянский, В.П. Смоленцев, А.Г. Суслов, В.М. Торбило, М.А. Тамаркин, А.В. Тотай, П.А. Чепя, Е. Albert, А.М. Hassan, B.R. Saiaf, A.R. Sunal и др. Установлено, что несмотря на широкое применение способов ППД по схеме качения (обкатка шариком или ро-

ликом) и скольжения (алмазное выглаживание), в связи с быстро возрастающими требованиями к качеству поверхностного слоя деталей машин, традиционные способы ППД исчерпали свои технологические возможности при решении определенных задач по обеспечению качественных требований к изделиям: повышение производительности, одновременное повышение НДС с улучшением механических характеристик, например, достижение больших сжимающих напряжений с большой глубиной наклепа, или получение большой микротвердости с мелкозернистым структурным строением. Существующие недостатки при использовании традиционных способов ППД связаны в основном с технологическими параметрами процесса ППД, в том числе с геометрической формой деформирующего инструмента и его кинематикой. Так как при использовании традиционных способов ППД деформирующий инструмент в основном находится в «пассивном» состоянии, например, неподвижный (в случае выглаживания) или вращается с одинаковой частотой с заготовкой (обкатывание шариком или роликом).

С учетом вышеизложенного была поставлена цель диссертационной работы - создание и изучение нового способа и технологии ППД – маятникового ППД, которое базируется на комбинации двух процессов (качение и скольжение), обеспечивающее получение высококачественного поверхностного слоя цилиндрических изделий.

**Во второй главе** рассмотрен новый способ для отделочно-упрочняющей обработки наружной поверхности цилиндрических деталей, сущность которого основана на использовании маятникового движения рабочего инструмента в виде кругового сектора (рис. 1). Новизна способа ППД подтверждена патентом РФ (№2757643).

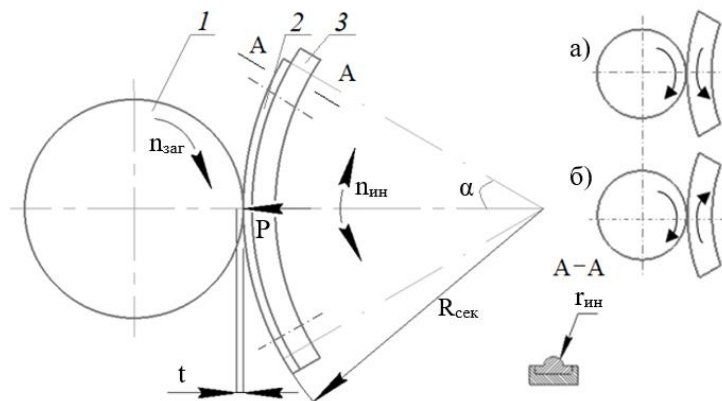


Рисунок 1 – Схема маятникового ППД:

1 – заготовка, 2 – деформирующий элемент, 3 – рабочий сектор  
а) схема качения; б) схема скольжения

Особенность новой кинематики деформирующего инструмента заключается в том, что поверхностное пластическое деформирование осуществляется за счет чередования двух процессов качения и скольжения рабочего инструмента: при движении рабочего инструмента и заготовки в противоположных направлениях происходит процесс плавного качения (см. рис. 1а), а при движении их в одном направлении – интенсивное скольжение (см. рис. 1б). Выполнение рабочего инструмента в виде кругового сектора с радиусом скругления по сравнению с прямой формой обеспечивает повышение давления в зоне деформации за счет снижения площади контакта при постоянной величине радиального натяга, тем самым повышается интенсификация напряженного состояния в очаге деформации.

В работе проведен сравнительный анализ кинематических особенностей схемы обработки маятникового ППД и других известных кинематик ППД, результаты которого позволяют прогнозировать состояние поверхностного слоя обрабатываемых изделий и судить о возможности рационального применения предлагаемого способа (маятниковое ППД).

При анализе кинематики процесса маятникового ППД видно, что наличие колебательного движения рабочего инструмента обуславливает одновременное изменение составляющих скоростей рабочего инструмента  $V_x$  и  $V_z$ , которые значительно расширяют диапазон ва-

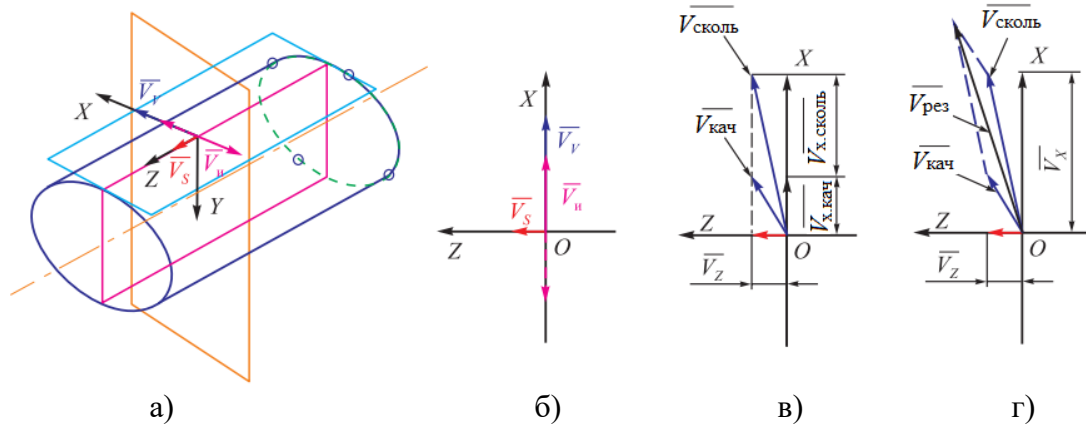
рырования результирующей переменной скорости, что позволяет управлять кинематическими параметрами процесса упрочнения, влияющими на параметры качества поверхностного слоя (см. рис. 2). При этом результирующая скорость при маятниковом ППД определяется следующим выражением:

$$V_{рез} = \sqrt{(V_v + V_{ин})^2 + V_s^2}, \quad (1)$$

где  $V_v$  – линейная скорость вращения заготовки;

$V_{ин}$  – колебательная скорость рабочего инструмента;

$V_s$  – скорость инструмента в направлении продольной подачи.



а)

б)

в)

г)

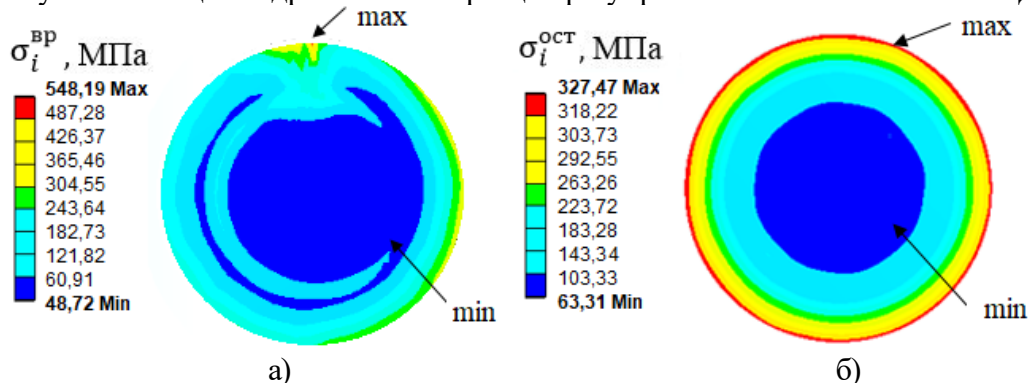
Рисунок 2 – Схема векторов скоростей при маятниковом ППД:

а) размещение векторов скоростей, б) проекции скоростей на систему координат,

в) размещение составляющей скорости скольжения и качения, г) диапазон изменения результирующей скорости

На базе программного пакета ANSYS создана конечно-элементная модель процесса маятникового ППД. При этом в качестве деформирующего инструмента использован круговой сектор ( $R_{сек} = 25$  мм) с радиусом скругления ( $r_{ин} = 5$  мм) на цилиндрической поверхности – материал принят как абсолютно жесткое тело, а заготовка выполнена в виде цилиндрического образца из стали 45 ( $\sigma_T = 360$  МПа,  $\sigma_B = 600$  МПа) диаметром 20 мм как упругопластическое тело. Коэффициент трения в зоне контакта принят  $\eta = 0,1$ . Технологические параметры процесса маятникового ППД следующие: радиальный натяг ( $t$ ); продольная подача ( $s$ ); частота вращения заготовки ( $n_{зар}$ ); частота маятникового движения рабочего инструмента ( $n_{ин}$ ); угловая амплитуда рабочего инструмента ( $\alpha$ ).

На рис. 3 показаны результаты определения временных и остаточных напряжений по поперечному сечению цилиндрического образца при упрочнении маятниковым ППД.



а)

б)

Рисунок 3 – Примеры распределения интенсивности временных (а) и остаточных (б) напряжений по поперечному сечению образца при маятниковом ППД

Для оценки обобщенного напряженного состояния цилиндрического образца при конечно-элементном моделировании определена интенсивность временных и остаточных



напряжений по осям  $O_z$  (осевые  $\sigma_z^{BP}$ ,  $\sigma_z^{ост}$ ),  $O_x$  (радиальные  $\sigma_r^{BP}$ ,  $\sigma_r^{ост}$ ),  $O_y$  (тангенциальные  $\sigma_\varphi^{BP}$ ,  $\sigma_\varphi^{ост}$ ). При этом временное напряженное состояние цилиндра по Мизесу определяется по интенсивности временных напряжений следующим выражением (интенсивность остаточных напряжений вычисляется по аналогичной формуле):

$$\sigma_i^{BP} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{BP} - \sigma_\varphi^{BP})^2 + (\sigma_\varphi^{BP} - \sigma_r^{BP})^2 + (\sigma_r^{BP} - \sigma_z^{BP})^2]}. \quad (2)$$

Результатами численных расчетов установлено, что интенсивность максимальных временных напряжений в зоне контакта с рабочим инструментом достигает около 550 МПа. После маятникового ППД в заготовке формируется интенсивность остаточных напряжений, которая достигает максимального значения (327 МПа) на поверхности заготовки.

На рис. 4 показан характер распределения компонент временных и остаточных напряжений вдоль радиуса цилиндрического образца после маятникового ППД. Установлено, что при непосредственном воздействии секториального рабочего инструмента в процессе маятникового ППД в поверхностном слое формируются в основном компоненты временных сжимающих напряжений по трем осям координат. При этом в центральной зоне заготовки возникают небольшие растягивающие осевые и тангенциальные напряжения, величина которых составляет 45–55% от предела прочности материала (см. рис. 4а).

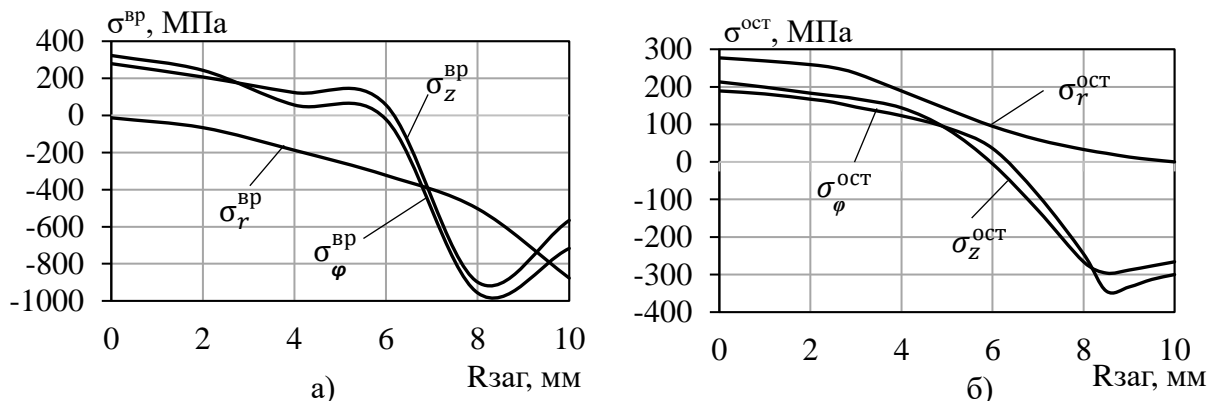
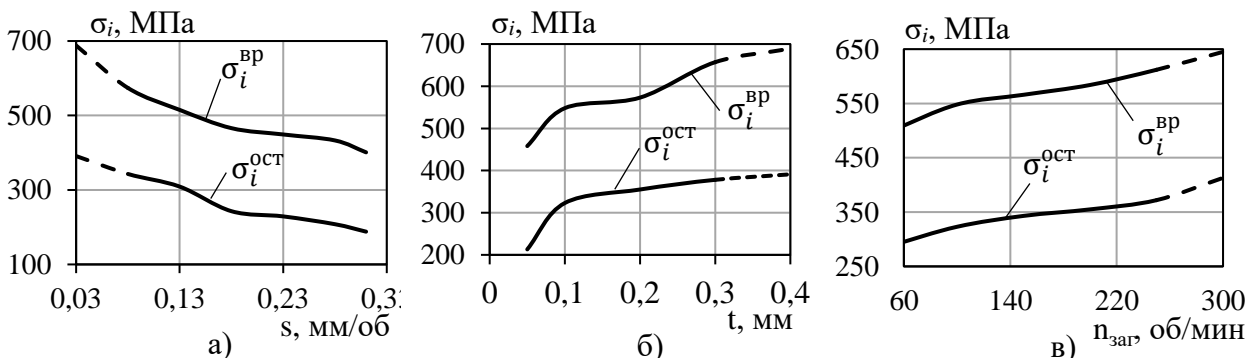


Рисунок 4 – Распределение компонент временных (а) и остаточных (б) напряжений вдоль радиуса цилиндрического образца

После прекращения воздействия рабочего инструмента интенсивность остаточных напряжений в поверхностном слое образуется в основном за счет формирования больших осевых (около -300 МПа) и тангенциальных (около -340 МПа) остаточных напряжений сжатия. При этом сжимающие напряжения по этим двум осям координат достигают максимального значения на глубине  $1,5 < p < 2$  мм от периферии. В зоне подповерхностного слоя растягивающие радиальные остаточные напряжения довольно низкие, а на поверхности детали они равны нулю.

На рис. 5 представлено влияние технологических параметров маятникового ППД на величину интенсивности сжимающих временных и остаточных напряжений поверхностного слоя заготовки. Установлено, что кроме величины продольной подачи, все технологические параметры оказывают прямое влияние на формирование интенсивности временных и остаточных напряжений сжатия, при этом величина радиального натяга является самой значимой.



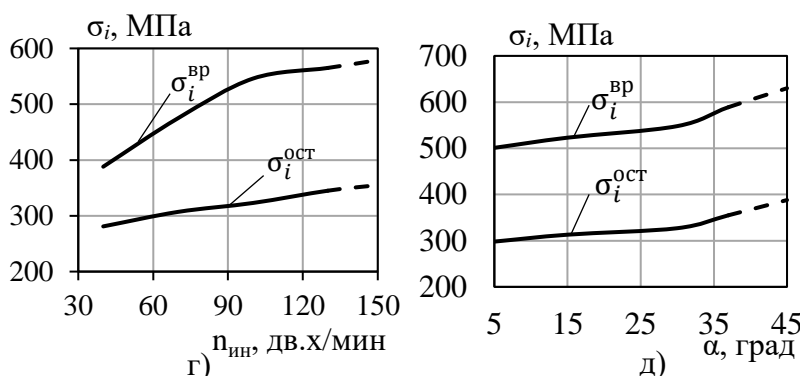


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений от следующих параметров:  
 а) величины подачи,  
 б) величины натяга,  
 в) частоты вращения заготовки,  
 г) частоты рабочего инструмента,  
 д) угловой амплитуды

Для выявления влияния физико-механических свойств материала на временные и остаточные напряжения деталей, упрочненных маятниковым ППД, в работе выполнены расчеты для некоторых черных и цветных металлов (рис. 6). Установлено, что при одинаковых режимах обработки маятниковым ППД наблюдается однозначная закономерность изменения интенсивности временных и остаточных от предела текучести материала, а при близких их значениях более высокие напряжения формируются у материала с большим значением модуля упругости.

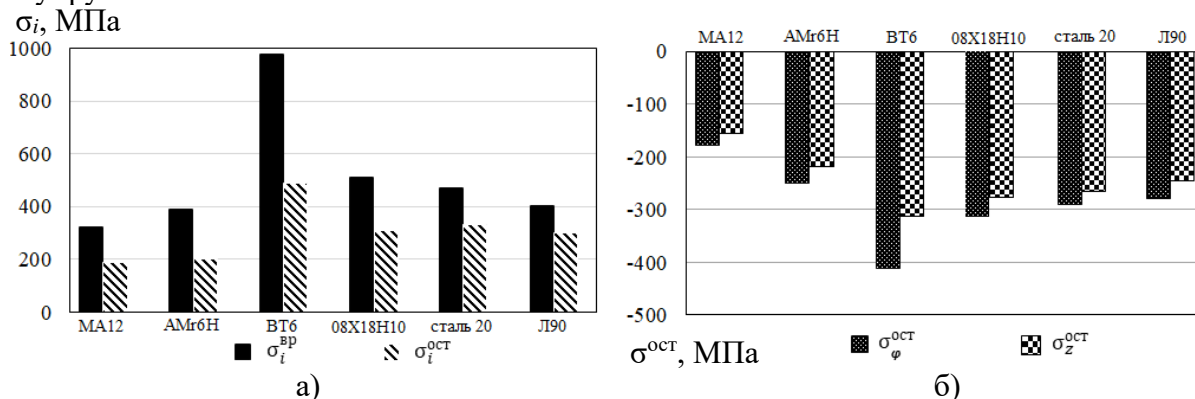


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности напряжений (а) и компонент остаточных напряжений (б) от физико-механических свойств материалов

С помощью программного пакета Statistica 10.1 проведен множественный регрессионный анализ с применением метода наименьших квадратов для определения рациональных размеров рабочего инструмента (секториальный  $R_{сек}$  и рабочий  $r_{ин}$  радиусы), обеспечивающих получения максимальных остаточных напряжений сжатия (рис. 7). При этом математическая модель имеет вид степенно-показательного уравнения:

$$\sigma_i^{ост} = 779R_{сек}^{-0,105}r_{ин}^{-0,371} \tag{3}$$

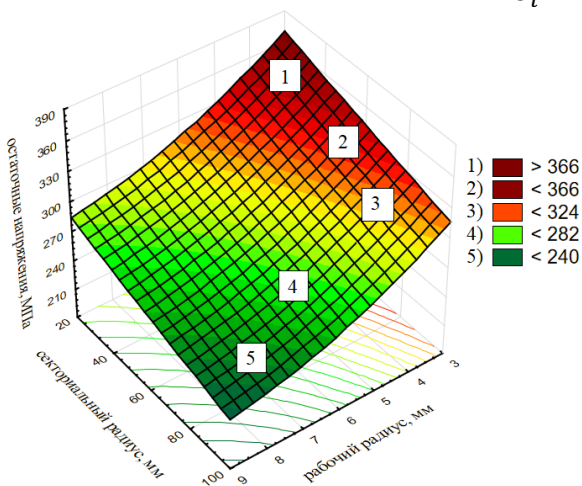


Рисунок 7 – Зависимость интенсивности остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя от секториального и рабочего радиусов деформирующего инструмента

Погрешность расчета при использовании модели (3) не превышает 7,4%, при этом коэффициент детерминации достаточно высокий (0,88). Из рис. 7 видно, что с уменьшением секториального и рабочего радиуса инструмента сжимающие остаточные напряжения увеличиваются, при этом с точки зрения повышения напряженного состояния поверхностного слоя заготовки и обеспечения равномерного процесса изнашивания рабочего инструмента при маятниковом ППД следует выбирать секториальный радиус от 50 до 70 мм и рабочий радиус от 3 до 4 мм.

В работе определено влияние геометрии рабочего инструмента и технологических параметров маятникового ППД на линейные размеры упругопластических волн. Установлено, что упругопластическая волна, образующаяся в направлении подачи ( $B'$ ), имеет большие длину и высоту, чем в направлении главного движения ( $B$ ) по следующим соотношениям:  $h' = 1,56...1,72h$ ;  $l' = 1,64...1,75l$ . При этом если зависимости линейных размеров волн от величины радиального натяга описываются полиномиальной функцией (в направлении главного движения:  $l = -3,7t^2 + 5,1t + 0,74$ ,  $h = 0,09t^2 + 0,14t + 0,002$ , в направлении подачи:  $l' = -3,88t^2 + 5,19t + 1,65$ ,  $h' = -0,09t^2 + 0,15t + 0,016$ ), то зависимости линейных размеров волн от величины подачи являются степенными (в направлении главного движения  $h = 0,0345s^{0,14}$ ,  $l = 1,6953s^{0,07}$ ; в направлении подачи:  $l' = 2,6631s^{0,06}$ ,  $h' = 0,0571s^{0,12}$ ).

На рис. 8 показано распределение временных напряжений в волнах в направлении главного движения ( $B$ ) и в направлении подачи ( $B'$ ). Установлено, что даже при большой величине натяга формируются максимальные растягивающие напряжения в вершинах волн величиной около 45 – 60 МПа. Эти напряжения примерно в 10 – 13 раз меньше предела прочности материала (600 МПа), что не оказывают негативного влияния на прочность упрочненных поверхностей.

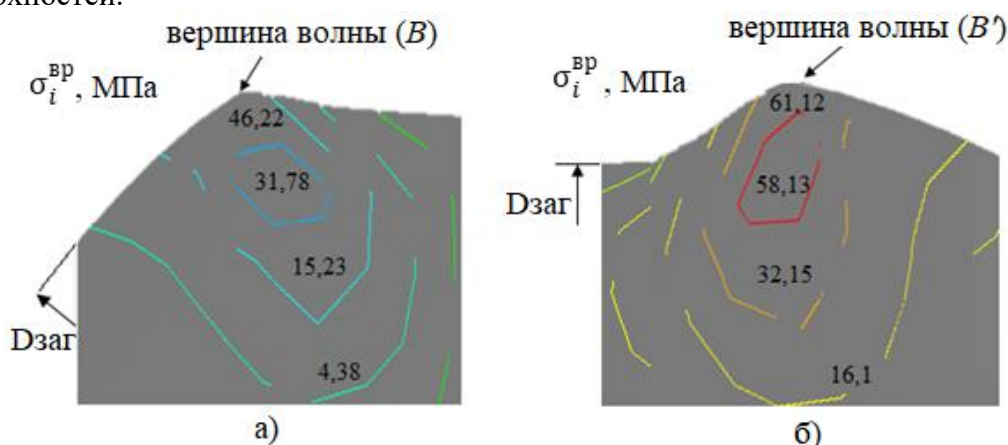


Рисунок 8 – Распределение временных напряжений в упругопластической волне: а) в направлении главного движения; б) в направлении подачи

В работе определено влияние маятникового ППД на величину подъема металла ( $\Delta$ ). Выявлено, что в процессе упрочнения за инструментом формируется небольшая волна высотой ( $h_{\Delta}$ ). Это высота снижается до некоторой постоянной величины после перемещения рабочего инструмента вследствие упругой разгрузки и представляет собой степень подъема металла ( $\Delta$ ). Установлена зависимость ( $\Delta$ ) от величины натяга:  $\Delta = -0,004t^2 + 0,0065t + 0,001$ . При упрочнении заготовок диаметрами от 10 до 20 мм подъем металла ( $\Delta$ ) можно сопоставить с точностью диаметральных размеров по 2 – 3 качеству, а при обработке заготовок диаметрами от 40 до 60 мм – с точностью по 1 качеству.

На рис. 9 представлена зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений и их компонент от температуры при маятниковом ППД образцов из стали 45. Результатами моделирования термического процесса при маятниковом ППД установлена критическая температура (около 135 – 150 °С), выход за которой приводит к снижению интенсивности сжимающих остаточных напряжений, а следовательно, эффективности процесса упрочнения. В условиях выбранных режимов обработки максимальная температура в очаге де-

формации находится в интервале 75 – 130 °С, что не сказывается отрицательно на эффективности процесса маятникового ППД.

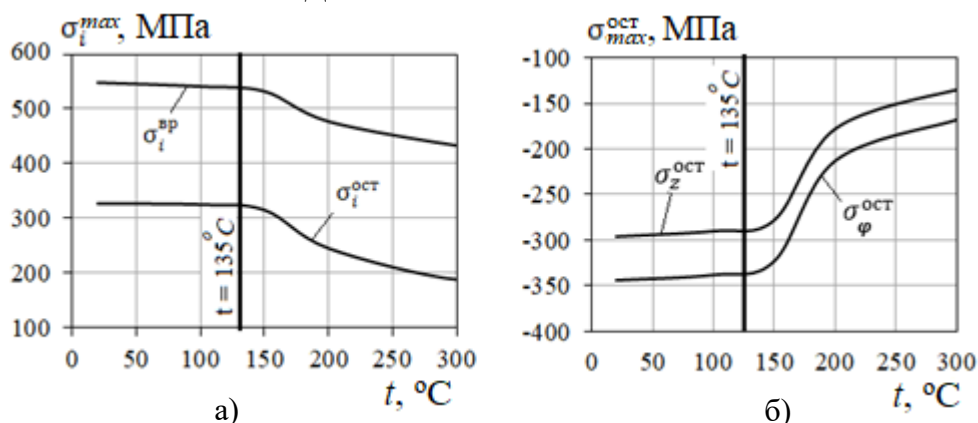


Рисунок 9 – Зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений (а) и их компонент (б) от температуры при маятниковом ППД образцов из стали 45

В третьей главе представлены результаты экспериментального определения влияния параметров и режимов маятникового ППД на показатели качества поверхностного слоя цилиндрических деталей.

Экспериментальные исследования проведены на токарном станке 1К62, где вместо верхней части суппорта устанавливается устройство для маятникового движения секториального рабочего инструмента (рис. 10), принцип работы которого заключается в использовании шагового электродвигателя, управляемого запрограммированной системой персонального компьютера. При этом было разработано несколько конструкций устройств для маятникового ППД, защищенных патентами РФ №2751947 и №2763061.

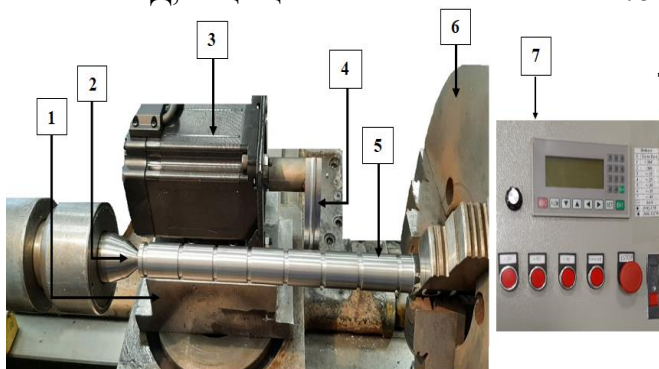


Рисунок 10 – Общий вид устройства для маятникового ППД наружных поверхностей цилиндрических деталей:

1 – основание; 2 – задний центр; 3 – мотор-редуктор; 4 – рабочий инструмент; 5 – опытный образец; 6 – трехкулачковый патрон; 7 – панель управления параметрами движения инструмента

Характеристики рабочего инструмента следующие: секториальный радиус  $R_{сек} = 65$  мм, рабочий радиус  $r_{ин} = 3$  мм; материал – быстрорежущая сталь P18 (твердость HRC 62-65); шероховатость рабочей поверхности  $Ra = 0,08 - 0,16$  мкм. Характеристики заготовки: цилиндрические образцы из стали 45 диаметром 20 мм, разделены поперечными канавками на 6 одинаковых участков по длине и диаметру, которые обрабатываются с использованием разных технологических параметров и режимов обработки. В качестве технологической смазки использовано индустриальное масло И-40А.

Приняты следующие базовые режимы упрочнения маятникового ППД:  $t = 0,07$  мм;  $s = 0,07$  мм/об;  $n_{заг} = 100$  об/мин.;  $\alpha = 20^\circ$ ;  $n_{ин} = 55$  дв.х/мин.

**Шероховатость, волнистость и отклонение от круглости.** Результаты измерения шероховатости поверхностей до и после упрочнения показали, что маятниковое ППД способствует существенному уменьшению высотных и шаговых параметров микронеровностей по сравнению с параметрами исходной поверхности ( $Ra = 4,49$  мкм,  $Rz = 22,2$  мкм), при этом  $Ra$ ,  $Rz$  снижаются в 5 – 8 раз, а  $Sm$  снижается в 2,7 раза. Шероховатость поверхности после маятникового ППД доводится с 4-го до 8-го класса.

Как и шероховатость, волнистость цилиндрической поверхности после маятникового ППД значительно снижается, при этом в условиях базовых режимов обработки высота  $Wz$  и шаг  $Sw$  неровности поверхности уменьшаются соответственно на 30% и 50%.

Результатами измерения отклонения от круглости упрочненных деталей установлено, что после маятникового ППД отклонение от круглости ( $\Delta_{кр}$ ) уменьшается в 2,1 – 3,7 раза, при этом точность диаметральных размеров повышается на 3 – 4 квалитета.

Выявлено, что среди всех технологических параметров наибольшее влияние на шероховатость, волнистость и отклонение от круглости поверхности упрочненных деталей оказывают частота вращения заготовки и угловая амплитуда маятникового движения рабочего инструмента.

**Механические характеристики упрочненного поверхностного слоя.** В результате экспериментального определения влияния технологических параметров маятникового ППД на механические характеристики поверхностного слоя упрочненных деталей установлено, что твердость поверхностного слоя деталей, упрочненных маятниковым ППД, повышается в среднем на 9 – 12% (составляет 94 – 95 HRB) по сравнению с исходной твердостью (84,8 HRB).

На рис. 11 показано распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя образца после маятникового ППД. Установлено, что в условиях базовых режимов упрочнения микротвердость достигает максимального значения на глубине 50 мкм от поверхности (около 320  $HV_{0,2}$ ), при этом глубина наклепа составляет 0,88 мм.

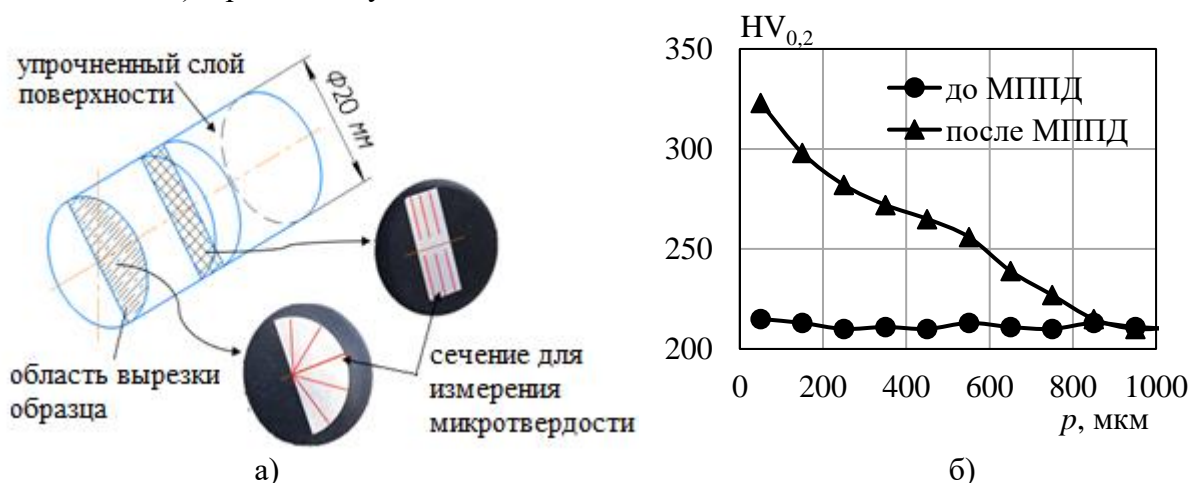


Рисунок 11 – Схема измерения микротвердости (а) и распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя после упрочнения (б) при базовых режимах обработки

Установлено, что с увеличением величины натяга от 0,05 до 0,2 мм микротвердость поверхностного слоя повышается примерно на 12% (микротвердость достигает 336  $HV_{0,2}$ ). Увеличение продольной подачи от 0,07 до 0,23 мм/об приводит к снижению микротвердости на 3 – 5%. Увеличение частоты вращения заготовки (от 80 до 200 об/мин.) и частоты маятникового движения рабочего инструмента (от 40 до 120 дв.х/мин.) также повышает микротвердость на 10 – 14%. Увеличение угловой амплитуды маятникового движения рабочего инструмента оказывает незначительное влияние на изменение микротвердости. При изменении технологических параметров и режимов маятникового ППД глубина наклепа находится в интервале 0,8 – 1,1 мм, при этом степень упрочнения составляет 45 – 65%.

**Остаточные напряжения упрочненного слоя.** На основе эффекта шумов Баркгаузена установлена связь между магнитоупругим параметром (МП) и механическими напряжениями для стали 45, которая описывается следующим выражением:  $\sigma_{расч} = 7,94МП - 509,6$ . Результаты экспериментальных измерений установлено, что после маятникового ППД на поверхности детали формируются сжимающие остаточные напряжения, величина которых варьируется в интервалах 250 – 340 МПа в зависимости от выбранных режимов обработки.




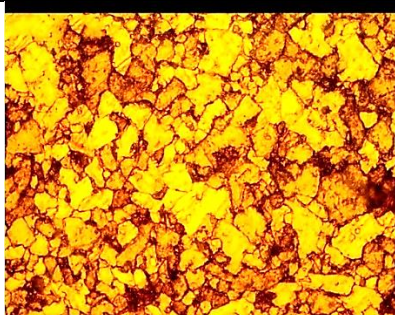
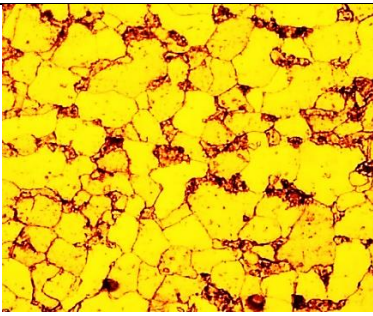
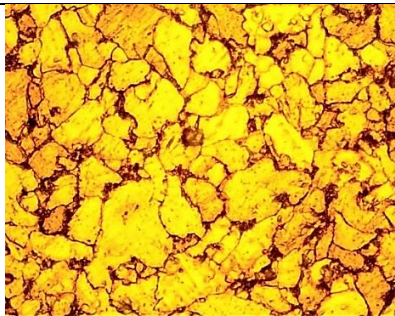
**Микроструктура упрочненного слоя.** Исследования микроструктуры проводили как в осевой, так и в поверхностной зоне цилиндрических заготовок, некоторые результаты которых представлены в табл. 1.

Установлено, что после маятникового ППД средние размеры зерен существенно снижаются, при том что микроструктура в упрочненной зоне характерна не только преобладанием сжатых зерен в радиальном направлении (направлении главной деформации), вытянутых в осевом направлении (направлении пластического течения), но и повышенной концентрацией измельченных твердых зерен перлита.

При изменении технологических параметров маятникового ППД в диапазоне выбранных интервалов средние размеры зерен составляют 15 – 20 мкм в поперечном сечении и 25 – 30 мкм в продольном. При этом степень уменьшения размеров зерен составляет 45 – 67%. Степень уменьшения размеров зерен практически находится в прямой зависимости от всех технологических параметров, кроме продольной подачи. Более значимым параметром, который вызывает существенно уменьшение зерен, является радиальный натяг.

Установлено, что коэффициент искажения формы зерен упрочненного слоя находится в диапазоне 0,15 – 0,5 в продольном сечении и 0,1 – 0,4 в поперечном. В поперечном сечении образца зерна более интенсивно искажаются как по размеру, так и по форме по сравнению с зернами в продольном направлении (см. табл. 1). После маятникового ППД плотность дислокаций кристаллических решеток повышается в 2,2 – 2,5 раза (достигает  $2,2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ ), что подтверждает механизм упрочнения, рассмотренный с точки зрения теории дислокаций.

Таблица. 1 – Микроструктура упрочненного образца из стали 45 после маятникового ППД (при базовых режимах упрочнения)

Тип сечения	Микроструктура упрочненного образца стали 45 (x500 крат)	
	Поперечное сечение	Продольное сечение
Поверхностная зона	 <p>27,5 мкм</p>	 <p>35,4 мкм</p>
Осевая зона	 <p>65,5 мкм</p>	 <p>70,2 мкм</p>

По результатам измерения микротвердости и микроструктуры упрочненного слоя подтверждена связь между ними; чем меньше средние размеры структурных зерен, тем выше микротвердость поверхностного слоя. При этом экспериментально установлена математическая связь между средним размером зерен и микротвердостью, которая описывается через полиномиальное уравнение:  $HV_{0,2} = -0,034L_{\text{сред}}^2 - 0,04L_{\text{сред}} + 365,16$  ( $R^2 = 0,98$ ).

В четвертой главе проведено сопоставление результатов численных расчетов при моделировании с результатами экспериментальных исследований. Установлено, что результаты экспериментальных измерений остаточных напряжений достаточно хорошо согласуются с ранее установленной закономерностью их изменения при моделировании в программе Ansys 19.1. При этом расхождение не превышает 18%. Расхождение результатов определения температуры в зоне контакта, полученных численным расчетом моделирования и экспериментальным определением с помощью тепловизора FlirSC7000 не превышает 15%.

В работе проведен сравнительный анализ предлагаемого способа (маятниковый ППД) с обкаткой роликом, по результатам которого выявлено, что при одинаковой величине натяга временные напряжения в случае маятникового ППД формируются значительно большие, чем в случае упрочнения по схеме качения и скольжения соответственно на 35% и 25%. При этом глубина упрочненного слоя при маятниковом ППД выше, чем упрочнения по схеме качения и скольжения соответственно на 50 и 30%. Кроме того, при одинаковых условиях обработки временные напряжения при маятниковом ППД секториальным рабочим инструментом выше, чем при ППД осциллирующем выглаживанием на 35%.

В работе представлены результаты коррозионных испытаний цилиндрических образцов из стали 45. Для оценки величины коррозии использован метод, основанный на изменении массы исследуемых образцов в результате воздействия коррозионной среды, оцениваемый по массовому показателю  $K_p$ , который представляет собой количество растворенного металла, отнесенное к площади исследуемой поверхности. Установлено, что после маятникового ППД интенсивность коррозии, происходящей на поверхности цилиндра, снижается значительно, при этом значение массового показателя коррозии  $K_p$  уменьшается на 25 – 35% и составляет около 0,55 – 0,6 мг/мм<sup>2</sup> (см. рис. 12).



Рисунок 12 – Интенсивность коррозионного процесса образцов из стали 45 в 15% растворе серной кислоты

На основе полученных результатов по влиянию технологических параметров маятникового ППД на шероховатость и интенсивность коррозии построена корреляционная зависимость между высотным показателем шероховатости  $R_a$  и показателем  $K_p$  (рис. 13). Выявлено, что коррозионная стойкость упрочненной поверхности маятниковым ППД тесно связана с шероховатостью поверхности, при этом связь между ними определяется следующим уравнением:  $K_p = 0,64Ra^{0,14}$  ( $R^2 = 0,98$ ).

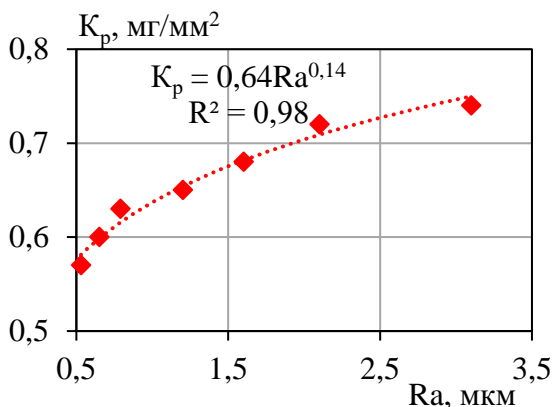


Рисунок 13 – Зависимость коррозионной стойкости упрочненных поверхностей от высотного параметра шероховатости ( $R_a$ )

Для определения рациональных режимов обработки маятниковым ППД, обеспечивающих получение наилучших показателей качества поверхностного слоя упрочненных деталей в работе приведены результаты множественного регрессионного анализа в программном пакете Statistica 10.1. При этом получены следующие эмпирические уравнения для каждого параметра качества поверхности упрочненных деталей из стали 45:

**Для шероховатости поверхности:**

При величине радиального натяга до 0,1 мм

$$R_a = 1,5 \cdot 10^{-9} R_{a.исх}^{1,31} s^{0,39} t^{-0,71} n_{заг}^{1,69} n_{ин}^{1,19} \alpha^{1,79}. \quad (4)$$

При величине радиального натяга свыше 0,1 мм

$$R_a = 1,5 \cdot 10^{-9} R_{a.исх}^{1,31} s^{0,39} t^{1,1} n_{заг}^{1,69} n_{ин}^{1,19} \alpha^{1,79}. \quad (5)$$

**Для волнистости поверхности:**

При величине радиального натяга до 0,1 мм

$$W_a = 5,62 \cdot 10^{-4} W_{a.исх}^{0,03} s^{0,62} t^{-0,46} n_{заг}^{1,34} n_{ин}^{0,2} \alpha^{0,75}. \quad (6)$$

При величине радиального натяга свыше 0,1 мм

$$W_a = 5,62 \cdot 10^{-4} W_{a.исх}^{0,03} s^{0,62} t^{1,36} n_{заг}^{1,34} n_{ин}^{0,2} \alpha^{0,75}. \quad (7)$$

**Для отклонения от круглости:**

При величине радиального натяга до 0,12 мм

$$\Delta_{кр} = 0,002 \Delta_{исх}^{0,03} s^{0,47} t^{-0,25} n_{заг}^{0,9} n_{ин}^{0,62} \alpha^{0,6}. \quad (8)$$

При величине радиального натяга свыше 0,12 мм

$$\Delta_{кр} = 0,002 \Delta_{исх}^{0,03} s^{0,47} t^{1,56} n_{заг}^{0,9} n_{ин}^{0,62} \alpha^{0,6}. \quad (9)$$

**Для показателя коррозионной стойкости:**

При величине радиального натяга до 0,1 мм

$$K_p = 0,08 s^{0,18} t^{-0,18} n_{заг}^{0,3} n_{ин}^{0,23} \alpha^{0,2}. \quad (10)$$

При величине радиального натяга свыше 0,1 мм

$$K_p = 0,08 s^{0,18} t^{0,12} n_{заг}^{0,3} n_{ин}^{0,23} \alpha^{0,2}. \quad (11)$$

Наличие двух уравнений для вышеуказанных параметров обусловлено неоднозначным влиянием величины натяга на эти характеристики качества поверхностного слоя.

**Для твердости (исходная твердость около 84,8 HRB):**

$$HRB = 84,9 s^{-0,009} t^{0,01} n_{заг}^{0,008} n_{ин}^{0,008} \alpha^{0,04}. \quad (12)$$

**Для микротвердости (исходная микротвердость около 215 HV<sub>0,2</sub>):**

$$HV_{0,2} = 199,5 s^{-0,04} t^{0,08} n_{заг}^{0,04} n_{ин}^{0,06} \alpha^{0,04}. \quad (13)$$

**Для глубины наклепа:**

$$h_n = 0,44 s^{-0,066} t^{0,2} n_{заг}^{0,08} n_{ин}^{0,125} \alpha^{0,056}. \quad (14)$$

**Для остаточных напряжений сжатия:**

$$\sigma_{эк}^{ост} = 37,5 s^{-0,14} t^{0,26} n_{заг}^{0,25} n_{ин}^{0,15} \alpha^{0,2}. \quad (15)$$

**Для временных напряжений сжатия:**

$$\sigma_i^{bp} = 620,5 s^{-0,34} t^{0,21} n_{заг}^{0,2} n_{ин}^{0,15} \alpha^{0,05}. \quad (16)$$

**Для степени уменьшения размера зерен:**

$$\Delta_L = 18,3 s^{-0,148} t^{0,14} n_{заг}^{0,1} n_{ин}^{0,12} \alpha^{0,09}. \quad (17)$$

**Для коэффициента искажения формы зерен:**

$$K = 18,6 s^{0,49} t^{-0,62} n_{заг}^{-0,29} n_{ин}^{-0,46} \alpha^{-0,51}. \quad (18)$$

По результатам определения рациональных режимов маятникового ППД выявлено, что режимы обработки для получения наилучших показателей, относящихся к НДС и механическим свойствам ( $HV_{0,2}$ , HRB,  $h_n$ ,  $\sigma_i^{ост}$ ,  $\sigma_i^{bp}$ ,  $K$ ,  $\Delta_L$ ), имеют практически близкие диапазоны варьирования технологических параметров, а для получения наилучших геометрических характеристик ( $R_a$ ,  $W_a$ ,  $\Delta_{кр}$ ) режимы обработки отличаются небольшим интервалом величины натяга. При этом рациональные режимы маятникового ППД для получения наилучших качественных поверхностей следующие:



- для показателей геометрических характеристик ( $R_a$ ,  $W_a$ ,  $\Delta_{кр}$ ):  $t = 0,1$  мм;  $s = 0,07$  мм/об;  $n_{заг} = 80$  об/мин.;  $\alpha = 15^\circ$ ;  $n_{ин} = 60$  дв.х/мин.;
- для показателей НДС и механических характеристик ( $HV_{0,2}$ ,  $HRB$ ,  $h_n$ ,  $\sigma_i^{ост}$ ,  $\sigma_i^{вр}$ ,  $K$ ,  $\Delta L$ ):  $t = 0,15$  мм;  $s = 0,11$  мм/об;  $n_{заг} = 150$  об/мин.;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $n_{ин} = 120$  дв.х/мин.

По полученным научно-техническим результатам исследования были разработаны технологические рекомендации для применения предлагаемого способа маятникового ППД на производстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям для разработки технологии отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей маятниковым поверхностным пластическим деформированием с использованием секториального рабочего инструмента. Решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в интенсификации напряженного состояния в очаге деформации без повышения радиального натяга с улучшением качества деталей машин. По завершению проведенных исследований в диссертационной работе получены следующие научно-практические результаты:

1. Предложена новая кинематика отделочно-упрочняющей обработки с разработкой нового способа маятникового ППД, позволяющего обеспечить повышение напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в готовых деталях, улучшить механические, эксплуатационные свойства и геометрические характеристики микропрофиля обработанных поверхностей. Способ защищен патентами РФ (№ 2753807 и № 2757643).
2. Построена конечно-элементная модель маятникового ППД, позволяющая установить влияние технологических параметров предлагаемого способа упрочнения на показатели напряженно-деформированного состояния деталей. Установлено, что с уменьшением секториального и рабочего радиусов инструмента интенсивность временных и остаточных напряжений повышается на 30 – 40 %. Более значимые параметры, оказывающие существенное влияние на повышение интенсивности временных и остаточных напряжений, являются величина натяга и частота вращения заготовки. Установлена прямая зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений от предела текучести материала при обработке некоторых черных и цветных металлов маятниковом ППД.
3. При упрочнении маятниковым ППД деталей из стали 45 даже с большой величиной натяга формируются максимальные растягивающие напряжения в вершинах упругопластических волн (около 45 – 60 МПа), величина которых в 10 – 13 раз меньше предела прочности материала. Результаты определения величины подъема металла показали, что при упрочнении заготовок диаметрами от 10 до 20 мм подъем металла ( $\Delta$ ) можно сопоставить с точностью диаметральных размеров по 2 – 3 качеству, а при обработке заготовок диаметрами от 40 до 60 мм – с точностью по 1 качеству.
4. Результаты моделирования термопроцесса показали, что при маятниковом ППД в очаге деформации формируется максимальная температура, значение которой изменяется от 75 до 130 °С. Установлена критическая температура для деталей из стали 45 (135 – 150 °С), превышение которой приводит к снижению интенсивности сжимающих остаточных напряжений. Расхождение результатов определения температуры в зоне контакта, полученных численным расчетом моделирования и экспериментальным определением не превышает 15%. С использованием технологической смазки в очаге деформации обеспечивается благоприятный тепловой режим, изменение которого находится в интервале 38 – 41 °С.
5. Результатами экспериментальных исследований установлено, что после маятникового ППД на поверхности заготовки формируются достаточно большие сжимающие остаточные напряжения (около 340 МПа) по сравнению с традиционными способами ППД. Полученные положительные результаты подтверждают техническую идею проведенных исследований по повышению напряженного состояния в очаге деформации за счет усложнения кинематики процесса упрочнения.

6. Экспериментально установлено влияние технологических параметров ППД на показатели качества и эксплуатационные характеристики упрочненных деталей. Маятниковое ППД способствует повышению механических свойств поверхностного слоя упрочненных деталей, при этом твердость увеличивается в 9 – 12%, микротвердость упрочненного слоя увеличивается в 1,5 – 1,6 раза. Шероховатость и волнистость поверхности после маятникового ППД снижаются в 4 – 8 раз. Отклонение от круглости обработанных деталей уменьшается в 2,1 – 3,7 раза. Коррозионная стойкость упрочненных деталей повышается на 25 – 35%.

7. После обработки маятниковым ППД наблюдается существенное уменьшение средних размеров зерен, причем степень уменьшения размеров зерен составляет 55 – 75% в поперечном сечении и 45 – 65% в продольном сечении. Средние размеры зерен составляют 15 – 30 мкм в поперечном сечении и 25 – 40 мкм в продольном. Искажение формы зерен после упрочнения увеличивается на 50 – 60%. Глубина наклепа находится в интервале 0,8 – 1,1 мм. Плотность дислокаций кристаллических решеток после маятникового ППД повышается в 2,2 – 2,5 раза (около  $2,2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ ).

8. Спроектировано и изготовлено устройство для реализации процесса маятникового ППД секториальным рабочим инструментом, позволяющее увеличить число факторов, влияющих на характер кинематического процесса упрочнения, и расширить возможности по усилению напряженно-деформированного состояния обрабатываемой поверхности по сравнению с традиционными способами ППД. Устройство защищено патентами РФ (№ 2751947 и 2763061).

9. В результате множественной регрессии определены рациональные режимы маятникового ППД, обеспечивающие получение наилучших показателей качества поверхности, причем рациональные режимы упрочнения для показателей геометрических характеристик следующие:  $t = 0,1 \text{ мм}$ ;  $s = 0,07 \text{ мм/об}$ ;  $n_{\text{заг}} = 80 \text{ об/мин.}$ ;  $n_{\text{ин}} = 60 \text{ дв.х/мин.}$ ;  $\alpha = 15^\circ$ . Для получения максимальных значений показателей НДС и механических характеристик установлены следующие режимы:  $t = 0,15 \text{ мм}$ ;  $s = 0,11 \text{ мм/об}$ ;  $n_{\text{заг}} = 150 \text{ об/мин.}$ ;  $n_{\text{ин}} = 120 \text{ дв.х/мин.}$ ;  $\alpha = 30^\circ$ .

10. Сопоставлена эффективность упрочнения маятниковым ППД в повышении напряженного состояния в очаге деформации с традиционными способами ППД (по схеме качения и скольжения). Выявлено, что при одинаковой величине радиального натяга временные напряжения в случае маятникового ППД формируются значительно большие, чем в случае упрочнения по схеме качения и скольжения соответственно на 35% и 25%. При этом глубина наклепа при маятниковом ППД составляет около 1,4 мм, что выше, чем упрочнения по схеме качения и скольжения соответственно на 50% и 30%. В одинаковых условиях обработки временные напряжения при маятниковом ППД секториальным рабочим инструментом выше, чем ППД осциллирующем выглаживанием, на 35%.

#### *Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы*

Полученные научно-технические результаты диссертационной работы могут быть использованы в качестве основы для разработки новой конструкции деформирующего инструмента, обеспечивающего более эффективное сглаживание микронеровностей, измельчения зерна и формирование регулярного микрорельефа.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

#### *В журналах из рекомендуемого перечня ВАК РФ*

1. Zaides, S.A., Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface / S.A. Zaides, **М.Ю. Но**, D.N. Mai // *Ipolytech Journal*. – 2021. – Т. 25, № 6. – С. 696–707.
2. Зайдес, С.А. Определение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при круговой осцилляции секториального рабочего инструмента / С.А. Зайдес, **М.Ю. Но** // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2022. – Т. 18. № 1(205). – С. 6–13.

3. Зайдес, С.А. Зависимость напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей от маятникового воздействия секториального рабочего инструмента / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Технология металлов. – 2022. – № 6. – С. 24–34.
4. Зайдес, С.А. Исследование напряженно-деформированного состояния деталей, упрочненных пластическим деформированием при циклическом нагружении / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Вестник машиностроения. – 2022. – № 8. – С. 28–35.
5. Зайдес, С.А. Оценка влияния тепловых полей на НДС деталей при маятниковом поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Сталь. – 2022. – № 9. – С. 32–36.
6. Зайдес, С.А. Отклонение от круглости цилиндрических деталей при маятниковом поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **М.К. Хо**, Х.К. Лэ // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 18. № 3(219). – С. 105–110.
7. Зайдес, С.А. Оценка величины упругой разгрузки при маятниковом поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 2(140). – С. 8–14.
8. Зайдес, С.А. Определение температуры в зоне контакта при маятниковом поверхностном пластическом деформировании конструкционной стали / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Технология металлов. – 2023. – № 4. – С. 9–16.
9. Зайдес, С.А. Определение волнистости цилиндрических деталей при маятниковом поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Технология металлов. – 2023. – № 5. – С. 8–16.
10. Зайдес, С.А. Влияние маятникового поверхностного пластического деформирования на коррозионную стойкость деталей машин / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 7(760). – С. 54–63.

**Статьи в изданиях, включенных в международную базу Scopus**

11. Зайдес, С.А. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – № 65(5). – Р. 344–353.
12. Zaides, S.A. Non-contact deformation during pendulum surface plastic deformation of structural steel / S.A. Zaides, **M.Q. Ho** // Chernye Metally. – 2022. – No. 1. – P. 55–60.
13. Zaides, S.A. Stress-strain state of components hardened by plastic deformation under cyclic loading / S.A. Zaides, **M.Q. Ho** // Russian engineering research. – 2022. – Vol. 42. – No. 11. – P. 1125–1132.
14. Zaides, S.A. Optimization of modes of pendular surface plastic deformation for intensification of the stress-strain state of carbon steel parts / S.A. Zaides, **M.Q. Ho** // Chernye Metally. – 2023. – No. 1. – P. 58–66.
15. Зайдес, С.А. Степень упрочнения и глубина наклепа при маятниковом поверхностном пластическом деформировании углеродистой стали / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – № 66(3). – Р. 272–282.

**Патенты РФ на изобретение**

16. Пат. № 2751947, Российская Федерация, В24В 39/04 (2021.02). Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / С.А. Зайдес, **М.К. Хо**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021103014, заявл. 09.02.2021; опубл. 21.07.2021. Бюл. № 21.
17. Пат. № 2753807, Российская Федерация, В24В 39/04 (2021.02). Способ поверхностного пластического деформирования цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, **М.К. Хо**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021102252, заявл. 02.02.2021; опубл. 23.08.2021. Бюл. № 24.
18. Пат. № 2757643, Российская Федерация, В24В 39/04 (2021.08). Способ поверхностного пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения / С.А. Зайдес, **М.К. Хо**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021102484, заявл. 04.02.2021; опубл. 19.10.2021. Бюл. № 29.

19. Пат. № 2763061, Российская Федерация, В24В 39/04; F16Н 19/08; F16Н 37/04 (2021.08). Устройство для образования маятникового движения рабочего инструмента / С.А. Зайдес, **М.К. Хо**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. № заявки 2021116866, заявл. 10.06.2021; опубл. 27.12.2021. Бюл. № 36.

*Статьи в других изданиях*

20. Зайдес, С.А. Определение напряженного состояния при воздействии секториального радиуса рабочего инструмента на цилиндрическую поверхность / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXVIII Междунар. научно-техн. конф. (г. Севастополь, 13 – 19 сентября 2021 г.). – Севастополь: Изд-во ДНТУ, 2021. – № 28. – С. 195–204.

21. Зайдес, С.А. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование при отделочно-упрочняющей обработке цилиндрических деталей транспортной техники / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология: сборник трудов III Междунар. научно-практич. конф. (г. Якутск, 16 апреля 2021 г.). – Якутск: Изд-во ЯИВТ, 2021. – С. 154–159.

22. **Хо, М.К.** Определение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при маятниковом воздействии секториального рабочего инструмента / **М.К. Хо**, С.А. Зайдес // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы XI Всерос. научно-практич. конф. с международным участием (г. Иркутск, 21–23 октября 2022 г.). – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. – С. 69–82.

23. **Хо, М.К.** Особенности моделирования процесса поверхностного пластического деформирования цилиндрических деталей с помощью компьютерной программы ANSYS / **М.К. Хо** // Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции: сборник трудов II Всерос. научно-практич. конф. (г. Омск, 26 октября 2021 г.). – Омск: Изд-во ОИВТ, 2021. – Ч. 1. – С. 178–183.

24. Зайдес, С.А. Влияние геометрии секториального рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Донецк, 2022. – № 1(76). – С. 19–28.

25. Зайдес, С.А. Определение величины подъема металла при маятниковом поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Инновации в машиностроении: материалы доклада XIII Междунар. научно-практич. конф. (г. Барнаул, 23–25 ноября 2022 г.). – Барнаул: Изд-во АлГТУ, 2022, – С. 223–229.

26. Зайдес, С.А. Механические свойства поверхностного слоя при маятниковом поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, **М.К. Хо** // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющих и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов - машиностроителей, (г. Ростов-на-Дону, 28 февраля 2023 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во Донской ГТУ, 2023. – С. 46–51.

Подписано в печать 21.09.2023. Формат 60 x 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Зак. 118. Поз. Плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83