

На правах рукописи

МИТРОФАНОВА КРИСТИНА СЕРГЕЕВНА

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО
СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
МУЛЬТИРАДИУСНЫМ РОЛИКОМ**

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» (КузГТУ)

Научный руководитель: **Блюменштейн Валерий Юрьевич**
доктор технических наук, профессор

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

Федонина Светлана Олеговна
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
«Металлорежущие станки и инструменты»
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет» (г. Иркутск)

Защита состоится «27» июня 2023 г. в 16 часа 00 минут часов на заседании диссертационного совета 24.2.277.01 созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корпус № 4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», а также на сайте университета <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/mitrofanova-kristina-sergeevna>

Автореферат разослан «02» мая 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.277.01
доктор технических наук, доцент

М. Н. Нагоркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Одной из ключевых задач современного машиностроения является повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств ответственных деталей машин.

Кемеровская область – Кузбасс является лидером по добыче угля в России, и до недавнего времени на предприятиях угольной промышленности превалировало импортное оборудование. Практически все виды горно-шахтного оборудования (ГШО) являются гидрофицированными ввиду высокой газоопасности угольных пластов; при этом основой горнодобывающих комплексов является силовая гидравлика: гидроцилиндры, гидродомкраты, гидрораспределители, а также валы вентиляционных насосов и другие. Штоки, как наиболее ответственные компоненты силовой гидравлики, изготавливаются из конструкционных сталей (стали 45, 40Х, 30ХГСА и др.); рабочие поверхности этих штоков должны иметь точность 7-8 квалитета, шероховатость Ra 0,4-0,8 мкм, поверхностный слой должен быть упрочнен до глубины 4-5 мм при высокой степени упрочнения (до 40% и более). Это связано с тем, что цилиндры силовой гидравлики в составе крепей обеспечивают поддержку крыши шахтных выработок на глубинах 200-400 м и более, испытывая при этом большое горное давление; штоки испытывают предельную нагрузку как статическую, работая в условиях растяжения, сжатия и кручения, так и динамическую (циклическую), связанную с колебаниями горного давления. При этом в силу сравнительно невысокого качества рабочей поверхности штоков, в том числе, после ремонта, на 30 ремонтируемых в год угольных ставов угольным компаниям приходится закупать 160 штоков. Достичь требуемые параметры качества возможно методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако, статические методы ППД не обеспечивают требуемую глубину и степень упрочнения поверхностного слоя до 4-5 мм и более 40% соответственно, из-за физических особенностей. Динамические методы, такие как центробежная и дробеструйная обработка, обработка микрошариками и др. также имеют ограничения, включая увеличение шероховатости обрабатываемой поверхности. Комбинированные методы упрочнения статической и динамической нагрузками также имеют недостатки, такие как малый КПД при динамическом нагружении (глубина упрочненного слоя составляет не более 0,09...0,15 мм), низкая производительность процесса упрочнения и сложность управления процессом упрочнения. Чтобы получить большие значения глубины упрочнения и степени необходимо увеличивать усилие обкатывания (натяг деформирующих инструментов). Однако существуют ограничения, связанные с возникновением впереди деформирующего инструмента пластической волны, которая разрушается при превышении натягов свыше 0,05 мм.

Анализ результатов исследований позволил выявить направления интенсификации процессов статического ППД, включая создание схем обработки с применением сложнопрофильных инструментов, сочетающих в одной наладке несколько деформирующих инденторов. Одним из таких инструментов является мультирадиусный ролик (МР-ролик, патент РФ № 2557377), разработанный на кафедре «Технология машиностроения» КузГТУ (Россия, г. Кемерово). МР-ролик позволяет создать требуемую схему нагружения даже при натягах свыше 0,15 мм, обеспечить высокие сжимающие напряжения в очаге деформации и обеспечить требуемые параметры качества поверхностного слоя.

Несмотря на эффективность данного процесса / данной схемы нагружения, которая характеризуется возможностью накопления больших деформаций и одновременным повышением качества ПС, остаётся ряд нерешенных задач. К числу таковых относятся: отсутствие теоретического обоснования процесса, стабильных результатов исследования качества поверхностного слоя, развитых проектных моделей, позволяющих проектировать данную технологию и другие. Отсутствие этих научных результатов сдерживает широкое внедрение процесса в промышленность.

Степень разработанности темы. Диссертационная работа основывается на результатах теоретических и экспериментальных исследований ППД; существенный вклад в развитие этих процессов внесли Афонин А. Н., Бабичев А. П., Балтер М. А., Блюменштейн В. Ю., Жасимов М. М., Зайдес С. А., Кузнецов В. П., Киричек А. В., Маркус Л. И., Матлин М. М., Папшев Д. Д.,

Рахимьянов Х. М., Смелянский В. М., Смоленцев В. П., Соловьев Д. Л., Суслов А. Г., Тамаркин М. А., *Altenberger I., Brinksmeier E., Hassan A. M., Klocke F., Song G. L., Slavov S. D., Prevey P. S., Rami A., Tang Z. Q., Wang W. W., Zhang X.* и другие.

Целью настоящего диссертационного исследования является повышение качества поверхностного слоя деталей путем создания высокого гидростатического давления в очаге деформации при ППД мультирадиусным роликом (МР-роликом).

Для достижения поставленной цели в работе **сформулированы и решены задачи:**

1. Выполнен литературный анализ и установлены направления интенсификации качества поверхностного слоя, обеспечивающие высокую долговечность в условиях приложения эксплуатационных циклических нагрузок.
2. Разработаны структурная и феноменологическая модели процесса ППД МР-роликом и выполнен теоретический расчет напряженно-деформированного состояния очага деформации и упрочненного поверхностного слоя.
3. Разработаны программа и оригинальные методики экспериментальных исследований качества поверхностного слоя при обработке ППД МР-роликом с учетом влияния технологического наследования.
4. Установлены закономерности формирования качества поверхностного слоя при обработке ППД МР-роликом с учетом явления технологического наследования свойств обрабатываемой детали, включая микрогеометрию, упрочнение и структурно-фазовый состав металла поверхностного слоя исследуемых материалов.
5. Выполнена практическая апробация результатов исследования и разработаны технологические рекомендации по проектированию нового технологического процесса и процесса восстановления поверхностного слоя деталей, обеспечивающие высокое качество поверхностного слоя изделия на технологической операции ППД МР-роликом.

Объект исследований – отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием мультирадиусным роликом.

Предмет исследований – качество поверхностного слоя, получаемое в результате интенсификации напряженно-деформированное состояние в очаге деформации, за счет создания высокого гидростатического давления.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Структурная и феноменологическая модели процесса ППД МР-роликом, описывающие закономерности формирования напряженно-деформированного состояния металла с выявленными зонами очага деформации с сложным напряженно-деформированным состоянием и преобладающим высоким гидростатическим давлением, недостижимым при традиционных методах ППД.
2. Результаты теоретических исследований и расчетов, устанавливающих возможности получения высокого уровня накопленных деформаций (ϵ_{xy} и $\epsilon_{плxy}$ от -0,916 до -0,787) и остаточных сжимающих напряжений (-850, - 960 МПа), приводящими к получению мелкозернистой структуры без разрушения поверхностного слоя металла детали.
3. Впервые установленную методами оптической, атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа картину пластического течения металла в стационарном очаге деформации образца из стали 45 после ППД МР-роликом. Установлено наличие четырех типов разноориентированных зерен в поверхностном слое образца со средним размером зерен не более 6-12 мкм. Наименьший размер зерен (не более 3-4,5 мкм) можно наблюдать в трех зонах перекрытия очагов деформации.
4. Экспериментальные зависимости микрогеометрии, упрочнения, структурно-фазового состояния металла поверхностного слоя стали 45 и армо-железа от режимов обработки ППД МР-роликом; выявленные методами оптической, атомно-силовой микроскопии и рентгеноструктурного анализа закономерности существенного увеличения микродисторсии кристаллической решетки и одновременного существенного уменьшения области когерентного рассеивания в зонах перекрытия зон очага деформации с преобладающим высоким гидростатическим давлением.

5. Алгоритм проектирования, технология и сложнопрофильные инструменты (ролики) для поверхностного пластического деформирования, позволяющие использовать исследуемый процесс, как при изготовлении новых, так и при восстановлении изношенных поверхностей эксплуатирующихся деталей машин на универсальных станках и станках с ЧПУ.

Научная новизна проведённых исследований:

1. Теоретически обоснована и экспериментально апробирована технология поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом (МР-роликом), отличающаяся оригинальной схемой нагружения поверхностного слоя, обеспечивающей высокое гидростатическое давление (до -960 МПа) в очаге деформации с получением высокого уровня накопленных деформаций (касательные компоненты тензора полных деформаций ϵ_{xy} и пластических деформаций $\epsilon_{плxy}$ от -0,916 до -0,787) и остаточных сжимающих напряжений (от -756 до -910 МПа), мелкозернистой структуры ($8 \pm 1,5$ мкм, при исходном размере зерна $55 \pm 4,5$ мкм) без разрушения поверхностного слоя детали (п. п. 3, 4 паспорта научной специальности 2.5.6).

2. Методами оптической (ОМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеноструктурного анализа (РСА) установлен характер влияния обработки ППД МР-роликом на формирование структурно-фазового состояния металла поверхностного слоя, выявлено (на примере стали 45) существенное увеличение остаточных напряжений второго рода (σ_{II} , от -1106 до -1408 МПа); увеличение микродисторсии (микрорискажений) кристаллической решетки ($\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}$, 10^{-3} от 1,6 до 2,2) с одновременным существенным уменьшением области когерентного рассеивания (ОКР) (D , нм, с 71 до 40 нм) в зонах перекрытия зон очага деформации с преобладающим высоким гидростатическим давлением (п. 7 паспорта научной специальности 2.5.6).

3. Установлен вид связи между микротвердостью, глубиной упрочнения, размерами зерна и режимами обработки ППД МР-роликом (п. п. 2, 7 паспорта научной специальности 2.5.6).

Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей формирования качества поверхностного слоя при интенсификации напряженно-деформированного состояния очага деформации методом поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом.

Практическая значимость работы заключается в создании финишного отделочно-упрочняющего способа обработки сложнопрофильным инструментом, обеспечивающим высокое гидростатическое давление в очаге деформации и значительный упрочняющий эффект с образованием наноразмерной структуры без разрушения поверхностного слоя металла обрабатываемой детали.

Методологической базой исследований являются основы технологии машиностроения, механика деформируемых тел, механика технологического наследования, теория прочности и разрушения твердых тел, результаты исследований в области упрочняющих технологий и механики поверхностного пластического деформирования, физики металлов и металловедения.

Апробация работы: результаты данной научной работы были представлены на конференциях: с VIII по XII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (2018-2021 гг.); 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: новые конструкционные материалы (Новосибирск, 2016); с VIII по XIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая» (г. Кемерово, 2016-2021 гг.); с I по IV Всероссийской молодежной научно-практической школы «Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении» (г. Кемерово, 2015-2018 г.); VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, 2018 г.); III Международной конференции «Наука будущего» и IV Всероссийском форуме «Наука будущего – наука молодых», (г. Сочи, 2019 г.); Международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (г. Брянск, 2020 г.); Научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (г. Ростов-на-Дону, 2020 г.); XIII Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании» (г. Белово, 2020 г.); Международной

научной конференции «Современные тенденции машиностроения и техносферной безопасности» (МТМЕЕ-2020) (г. Ростов-на-Дону, 2020 г.); Научном семинаре технологов машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий» (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, 2021 г.); XIX Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (СПГУ, г. Санкт-Петербург, 2021 г.); XIV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», БМР 2021 (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, 2021 г.), XII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича «Инновации в машиностроении», (НГТУ, г. Новосибирск, 2021 г.).

Публикации результатов работы. По результатам диссертационной работы опубликовано 34 научные работы, в том числе, 1 патент, 5 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 4 статьи в изданиях, входящих в перечень *Scopus* и *Web of Science*, 24 материала и тезисов в сборниках трудов научных конференций и семинаров.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 282 источника и 2 приложений. Работа изложена на 255 страницах, содержит 105 рисунков, 43 таблицы, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, основная идея и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость результатов работы, основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ результатов отечественных и зарубежных исследований в области поверхностного пластического деформирования (ППД), который позволил выявить перспективные направления, установить направления интенсификации режимов и повышения качества поверхностного слоя (ПС), обеспечивающие высокую долговечность в условиях приложения эксплуатационных циклических нагрузок. Весомый вклад в развитие данного метода внесли ученые: Афонин А. Н., Бабичев А. П., Балтер М. А., Барац Я. М., Блюменштейн В. Ю., Дрозд М. С., Жасимов М. М., Зайдес С. А., Кузнецов В. П., Киричек А. В., Киселев Е. С., Кудрявцев И. В., Маркус Л. И., Матлин М. М., Отений Я. Н., Папшев Д. Д., Рахимянов Х. М., Сидякин Ю. И., Смелянский В. М., Смоленцев В. П., Соловьев Д. Л., Суслов А. Г., Тамаркин М. А., Тотай А. В., Хибник Т. А., Ярославцев В. М., Ящерицын П. И., *Altenberger I., Brinksmeier E., Hassan A. M., Klocke F., Liu D., Song G. L., Slavov S. D., Prevey P. S., Rami A., Tang Z. Q., Wang B., Wang W. W., Zhang S., Zhang X.* Показано, что несмотря на широкое применение метода ППД, традиционные способы обкатывания (торовыми, коническими роликами или шариками) исчерпали свои технологические возможности в части производительности и получения больших по величине параметров механического состояния ПС. В связи с этим, было рассмотрено формирование качества ПС с точки зрения механики технологического наследования (ТН) и выявлены перспективные направления развития метода ППД, включая обработку комбинированными и совмещенными методами. Выявлено перспективное направление развития метода ППД, позволяющее нивелировать технологические ограничения путем создания оригинальной схемы нагружения, предполагающей наличие высокого гидростатического давления в очаге деформации поверхностного слоя обрабатываемой детали. Реализация данной схемы основана на применении сложнопрофильного деформирующего инструмента – мультирадиусного ролика (МР-ролик, патент РФ № 2557377) (рис. 1).

МР-ролик представляет собой комбинацию 4-х последовательно расположенных относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном направлении профильных радиусов: $R_{\text{пр1}} = 1$ мм и натягом $h_{\text{д1}} = 0,05$ мм; $R_{\text{пр2}} = 1$ мм и натягом $h_{\text{д2}} = 0,1$ мм; $R_{\text{пр3}} = 1$ мм и натягом $h_{\text{д3}} = 0,15$ мм; $R_{\text{пр4}} = 3$ мм и натягом $h_{\text{д4}} = 0,05$ м.

В заключение первой главы сформулированы цель, научная гипотеза и задачи диссертационной работы.

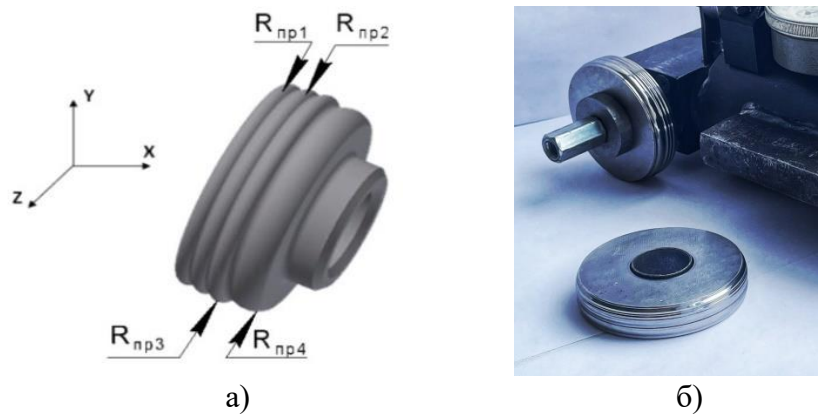
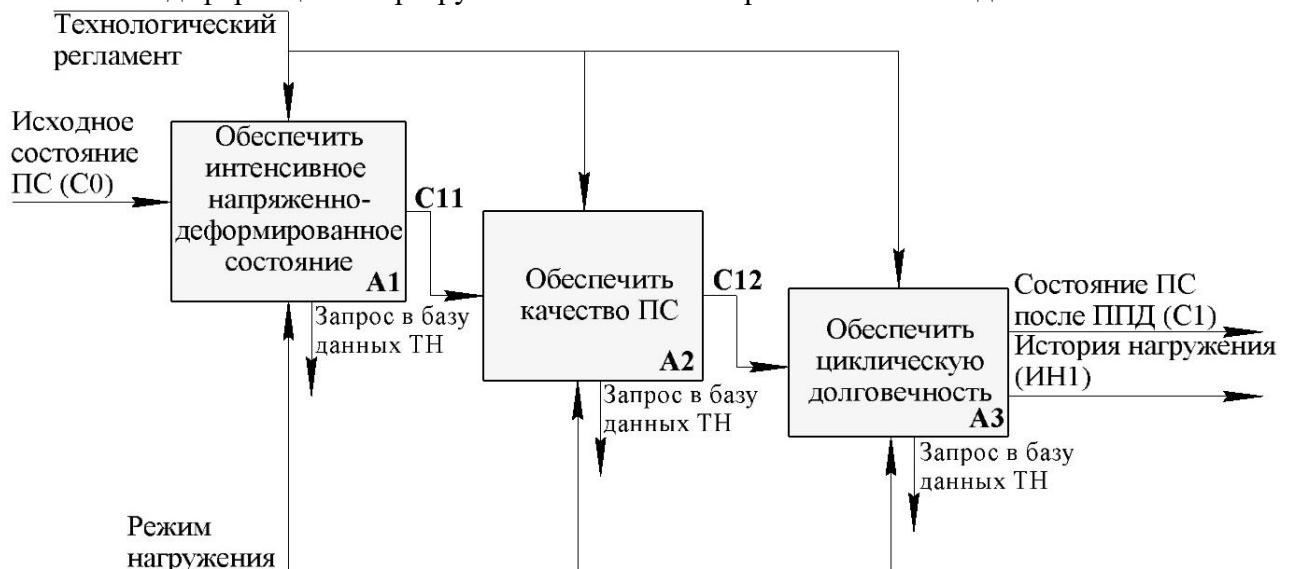


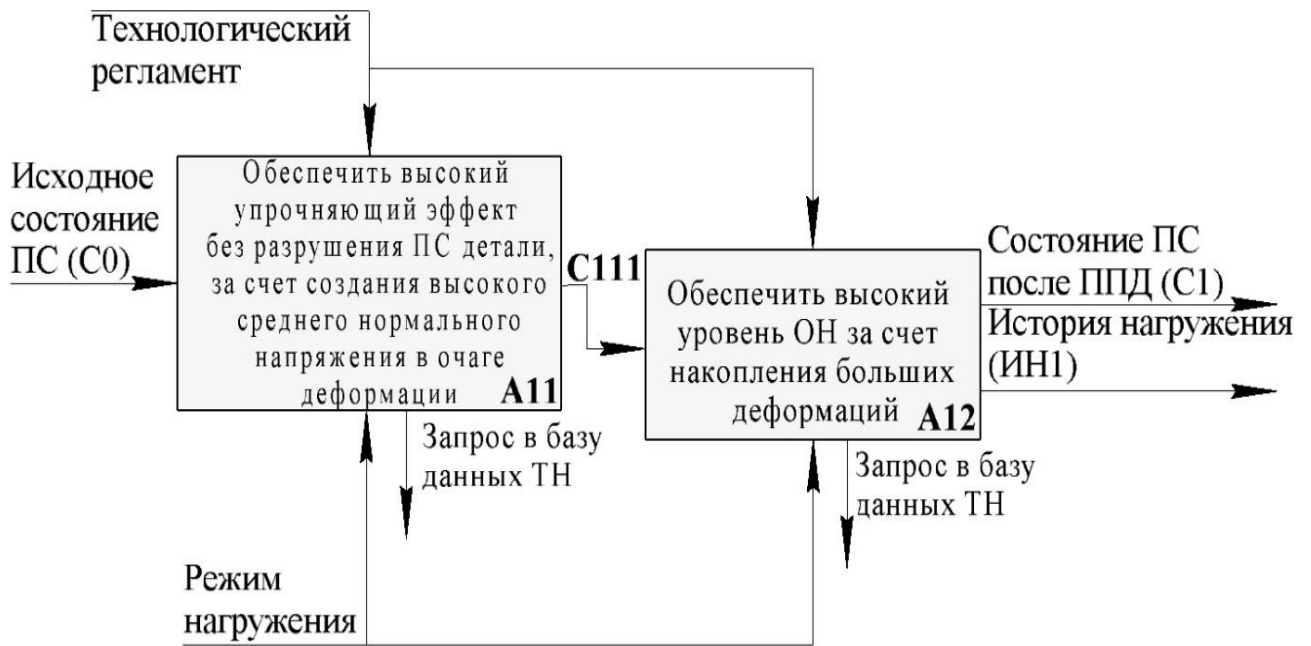
Рисунок 1. Мультирадиусный ролик (МР-ролик): а) 3D-модель МР-ролика; б) Фото МР-ролика

Во второй главе представлены разработанная структурная, феноменологическая и конечно-элементная (МКЭ) модели процесса ППД мультирадиусным роликом и выполнен расчет напряженно-деформированного состояния очага деформации и упрочненного поверхностного слоя на основе механики технологического наследования (ТН).

Для обобщения и систематизации большого объема информации, решения поставленных задач была разработана структурная модель формирования поверхностного слоя детали на стадии ППД МР-роликом на основе механики (ТН). В качестве основной выбрана функция «Интенсифицировать напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при ППД МР-роликом». Декомпозиция контекстной диаграммы позволила выделить основные параметры с целью управления механическим состоянием поверхностного слоя (рис. 2, а). В свою очередь, обеспечить интенсивное НДС можно путем: обеспечения высокого упрочняющего эффекта без разрушения ПС детали за счет создания высокого среднего нормального напряжения в очаге деформации (А11) (рис. 2, б); обеспечения высокого уровня сжимающих остаточных напряжений в ПС детали за счет накопления больших деформаций (А12) (рис. 2, б).

На основании существующих положений теории технологического наследования разработана феноменологическая модель процесса ППД МР-роликом (рис. 3). Выявлено, что обработка ППД МР-роликом состоит из четырех этапов нагружения поверхностного слоя (ПС) инденторами ролика ($R_{пр1}, R_{пр2}, R_{пр3}, R_{пр4}$), а также сопровождается возникновением в ПС очагов деформации (ОД₁, ОД₂, ОД₃ и ОД₄). В результате работы всех четырех инденторов МР-ролика, образуются 3 зоны перекрытия очагов деформации с преобладающим высоким гидростатическим давлением, которое, несмотря на большие натяги деформирующих элементов (до 0,15 мм и более), недостижимые при традиционных методах ППД, приводит к накоплению больших пластических деформаций без разрушения металла поверхностного слоя детали.





б)

Рисунок 2. Декомпозиции: а) диаграммы уровня А0; б) диаграммы уровня А1

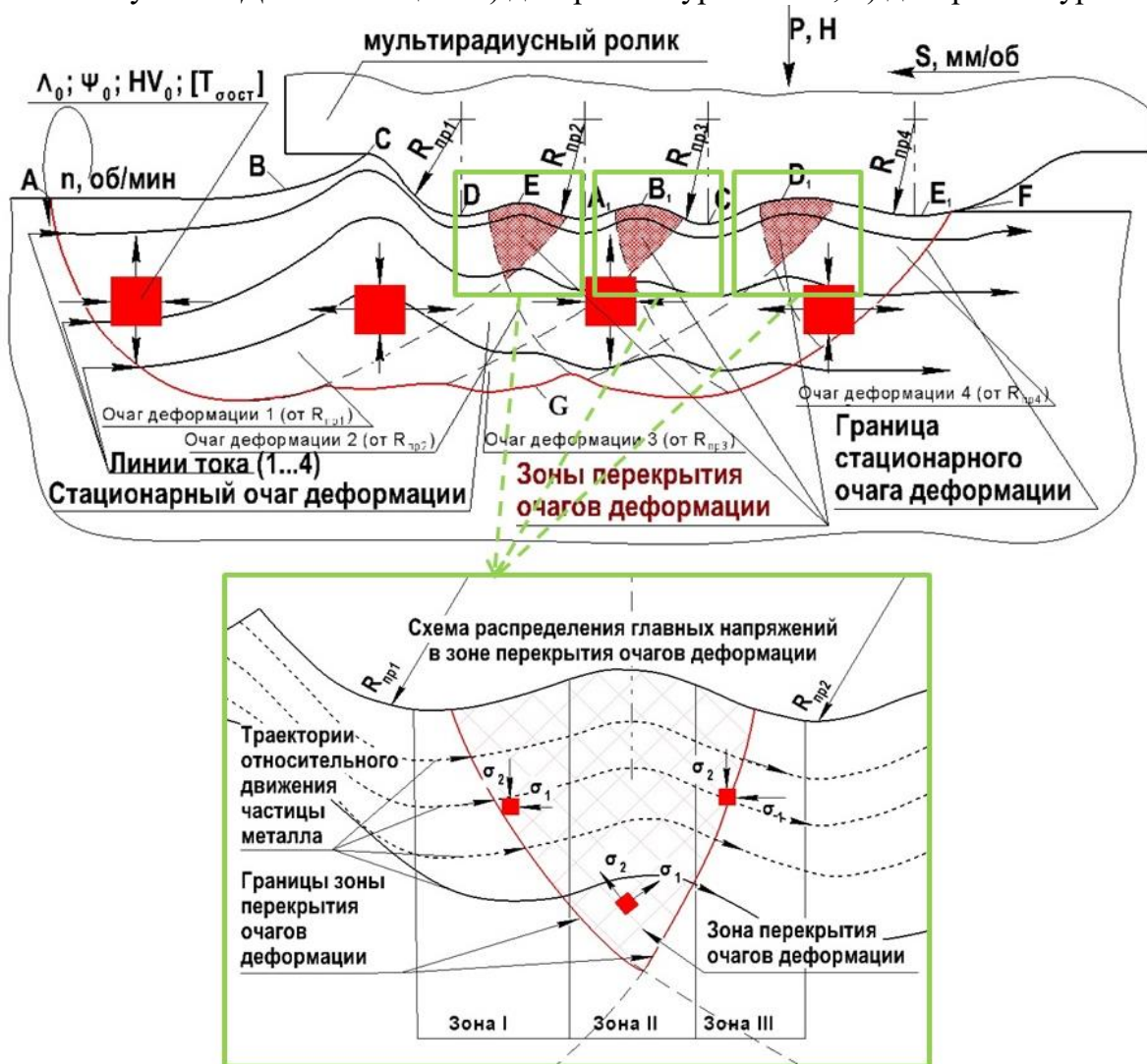


Рисунок 3. Схема процесса обработки МР-роликом, возникновение единого стационарного очага деформации (результат работы всех четырех инденторов МР-ролика) и зон перекрытия очагов деформаций, в которых преобладает высокое гидростатическое давление

Выявленные закономерности пластического течения металла в ОД при обработке ППД МР-роликом положены в основу последующего решения задач методом конечных элементов (МКЭ) в категориях механики технологического наследования.

Решена аналитическая задача механики деформирования, позволившая определить напряженно-деформированное состояние очага деформации и зон перекрытия, упрочненного поверхностного слоя, рассчитать смещения частиц металла, деформации и скорости деформации, а также накопленные в результате обработки МР-роликом свойства поверхностного слоя.

В соответствии с принятой постановкой создана КЭ-модель, состоящая из обрабатываемой заготовки и мультирадиусного ролика. В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент плоскости главных деформаций цилиндрической детали (длина $L=100$ мм и высота $h=60$ мм). Начальными и граничными условиями для моделирования фрагмента являлись физические и механические свойства стали 45 (ГОСТ 1050-88): диаграмма деформирования материала – билинейная, описываемая экстраполируемым пределом текучести $\sigma_{\text{эТ}} = 3,66 \times 10^8$ МПа; модуль Юнга $E=2 \times 10^{11}$ МПа, характеризующий угол наклона упругого участка α ; плотность $\rho = 7800$ кг/м³; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; коэффициент трения $\eta = 0,21$, т.к. тепловые явления не учитывались; тангенциальный модуль $T_{\text{мод}}$, МПа = $2,596 \times 10^6$; форма и геометрические размеры очага деформации, возникающего от воздействия инденторов МР-ролика.

Выявлено, что на протяжении всего процесса обработки можно наблюдать, как поля напряжений каждого из деформирующих элементов пересекаются между собой, образуя зоны перекрытия, и, соответственно, единый очаг деформации; данная картина полностью соответствует феноменологической модели (рис. 4). При этом локализация высокого гидростатического давления (минус 860-966 МПа) отмечена преимущественно между инденторами МР-ролика.

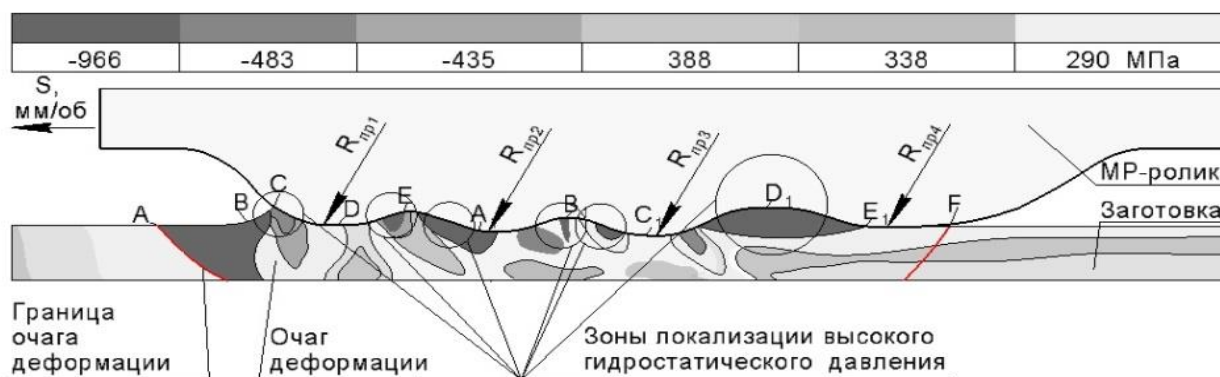


Рисунок 4. Схема распределения гидростатического давления в меридиональном сечении после 389-ого шага моделирования: A – точка начала пластической волны, B – точка начала подъема пластической волны, C – точка вершины пластической волны, D – точка характеризующая заднюю часть пластической волны, $E, F, A1, B1, C1, D1, E1$ – точки, характеризующие пластические волны от других инденторов МР-ролика

По итогам МКЭ-моделирования производился расчет параметров механического состояния по методике, разработанной Блюменштейном В. Ю., определялись инвариантные характеристики механики деформируемого твердого тела, такие как:

– показатель схемы напряженного состояния:

$$\Pi = \frac{\sigma}{T} = \frac{1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{1/\sqrt{6}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (1)$$

– степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \left\langle \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^t \sqrt{\frac{1}{2} [(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2]} + \frac{3}{4} (\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{zx}^2) \right\rangle dt, \quad (2)$$

– тензор остаточных напряжений:

$$[\mathbf{T}\sigma_{\text{ост}}]_{ij} = [\mathbf{T}\sigma_{\text{деф}}]_{ij} + [\mathbf{T}\sigma_{\text{раз}}]_{ij} + [\mathbf{T}\sigma_t]_{ij}. \quad (3)$$

— степень истощения запаса пластичности:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = \Psi_1 + (\Psi_{21} + \Psi_{22}) = n\varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_i^{n-1} d\Lambda + \left(\int_0^{\Lambda_k} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p} - \varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_p^{n-1} d\Lambda \right), \quad (4)$$

где σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные компоненты тензора напряжений; $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_{xy}, \eta_{yz}, \eta_{zx}$ – компоненты тензора скоростей деформаций; $[\mathbf{T}\sigma_{\text{деф}}]_{ij}$ – тензор напряжений нагрузки; $[\mathbf{T}\sigma_{\text{раз}}]_{ij}$ – тензор напряжений разгрузки; $[\mathbf{T}\sigma_t]_{ij}$ – тензор тепловых напряжений; Ψ_1 – составляющая, зависящая от напряжения текучести или от накопленной деформации; Ψ_2 – составляющая, зависящая от пластичности металла в условиях $\Pi = \text{const}$; Λ и Λ_p – накопленная и предельная степень деформации сдвига при данном показателе схемы напряженного состояния Π ; n – коэффициент деформационного упрочнения; φ_0 – коэффициент, определяемый на основе испытаний на пластичность. В неупрочненном металле $\Psi = 0$, а при полном истощении запаса пластичности $\Psi = 1$.

Выявлено, что начальное значение показателя схемы напряженного состояния (в зоне входа в ОД) составляет $\Pi = 0,746$, далее значение изменяется до $-1,304$ что соответствует началу накопления металлом деформации (рис. 5, а). Практически на протяжении всего ОД показатель схемы напряженного состояния отрицателен, достигая значений $\Pi = -0,696$ в районе вершин 2-го и 3-его ДЭ, что свидетельствует о интенсивности процесса деформации.

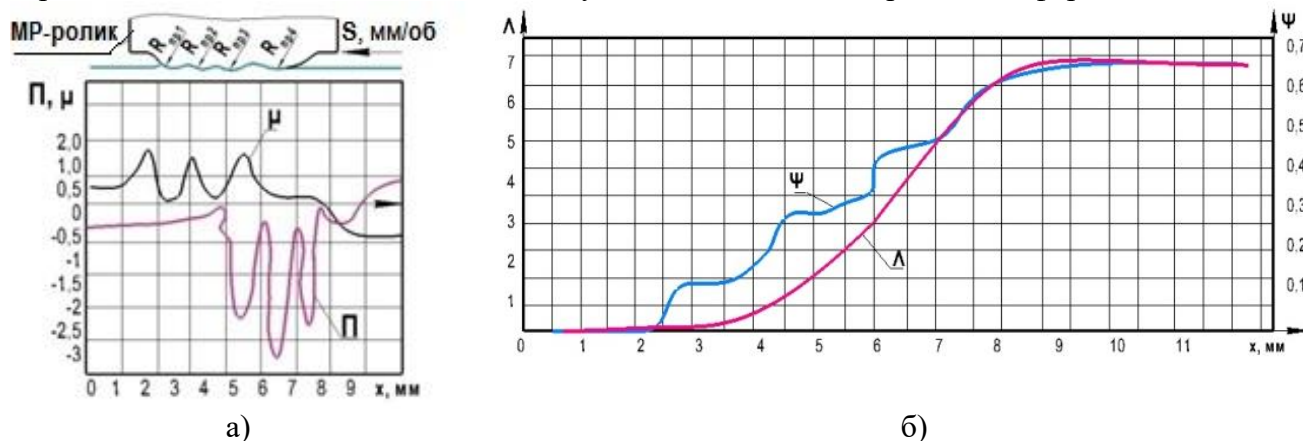


Рисунок 5. Распределение показателя схемы напряженного состояния Π и параметра Лоде μ ; б) Распределение накопленных значений степени деформации сдвига Λ и степени истощения запаса пластичности Ψ ($\Psi = 1$ – полное истощение запаса пластичности)

Отрицательные значения $\Pi = -0,593$ наблюдаются и в зоне выхода из ОД. Показатель вида напряженного состояния (показатель Лоде μ) имеет характер распределения, симметричный показателю схемы напряженного состояния (рис. 5, а). На рисунке 5 (б) представлено распределение накопленных значений степени деформации сдвига Λ и степени истощения запаса пластичности Ψ . Установлено, что при обработке МР-роликом волнообразно накапливаются существенные значения степени деформации сдвига, достигающие больших значений $\Lambda \approx 7$. Однако, несмотря на большие натяги деформирующих элементов, степень истощения запаса пластичности не превышает значений $\Psi \approx 0,68$ (рис. 5, б). Это свидетельствует в пользу выдвинутой научной гипотезы о том, что использование сложнопрофильных инструментов и создание очаге деформации зон перекрытия с большим гидростатическим давлением, позволяет существенно интенсифицировать процесс обработки без разрушения металла поверхностного слоя детали.

В третьей главе изложены программа и методики экспериментальных исследований, включающие в себя: выбор и обоснование исследуемого материала, технологического оборудования и оснастки, современных приборов и иных технических средств измерения, методики

пробоподготовки и исследования образцов. Определены режимы предварительной обработки резанием и обкатывания ППД МР-роликом на токарном станке с ЧПУ.

Выбраны материалы: модельный однофазный материал хорошо упрочняемый материал армко-железо ($HV_{исх.} 83...100$), позволяющий выявить физическую картину пластической деформации, и сталь 45 ($HV_{исх.} 160...180$), широко применяемая в машиностроении. Для изучения геометрических характеристик упрочненных образцов, параметров шероховатости, микротвердости и пробоподготовки металлографических шлифов для оптических и рентгеноструктурных исследований, применены оборудование и приборы лаборатории «Качество поверхностного слоя деталей машин» (КузГТУ, г. Кемерово): профилограф-профилометр *Talysurf-5*, микротвердомер *DuraScan 20*, отрезной станок *Discotom-6*, электрогидравлический пресс *CitoPress-1* и другие. Для определения параметров структуры (размеров зёрен и субзёрен, их однородности), изучения тонкой структуры (деформационного рельефа, размеров границ зёрен, включений, размеров зёрен), определения параметров кристаллической решетки, области когерентного рассеивания, микродисторсии кристаллической решетки, остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя, применены оборудование и приборы лаборатории «Физики прочности» (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск): оптический микроскоп отраженного света «*Neophot-21*», атомно-силовой микроскоп *Solver PH47-PRO*, рентгеновский дифрактометр ДРОН-3. Представлена методика статистической обработки результатов и построение математических моделей.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований геометрических параметров очагов деформации, влияния режимов процесса ППД МР-роликами с различной геометрией рабочей части инденторов на качество поверхностного слоя (шероховатость, упрочнение, микроструктуру, остаточные напряжения). Освещены результаты оптической и атомно-силовой микроскопии (ОМ и АСМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА), показано, что обработка ППД МР-роликом приводит существенному увеличению остаточных напряжений второго рода (σ_{II} , от -1106 до -1408 МПа); увеличению микродисторсии (микрорискажений) кристаллической решетки ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$, 10^{-3} от 1,6 до 2,2) и одновременному существенному уменьшению области когерентного рассеивания (ОКР) (D , нм, с 71 до 40 нм) в зонах перекрытия зон очага деформации с преобладающим высоким гидростатическим давлением; это приводит к формированию наноразмерной структуры металла; приведены зависимости параметров упрочнения (микротвердости) с параметрами структурно-фазового состояния. Показано, что обработка МР-роликом приводит к снижению шероховатости до уровня Ra 0,272-0,346 при исходной Ra 0,623-0,763 (рис. 6, а-б).

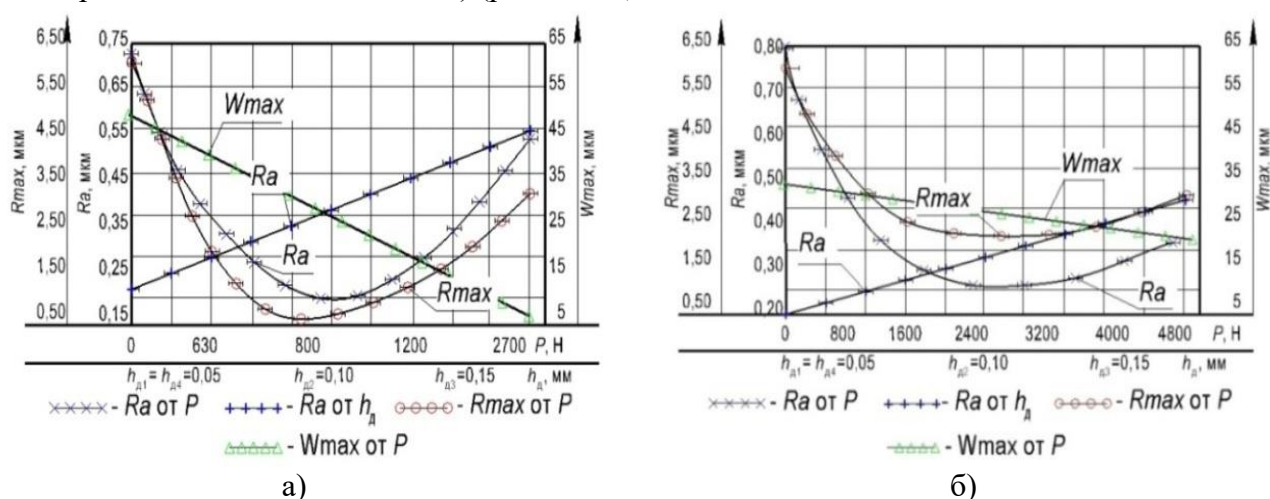


Рисунок 6. Экспериментальные значения параметров шероховатости образцов после ППД МР-роликом: а) для армко-железа; б) для стали 45

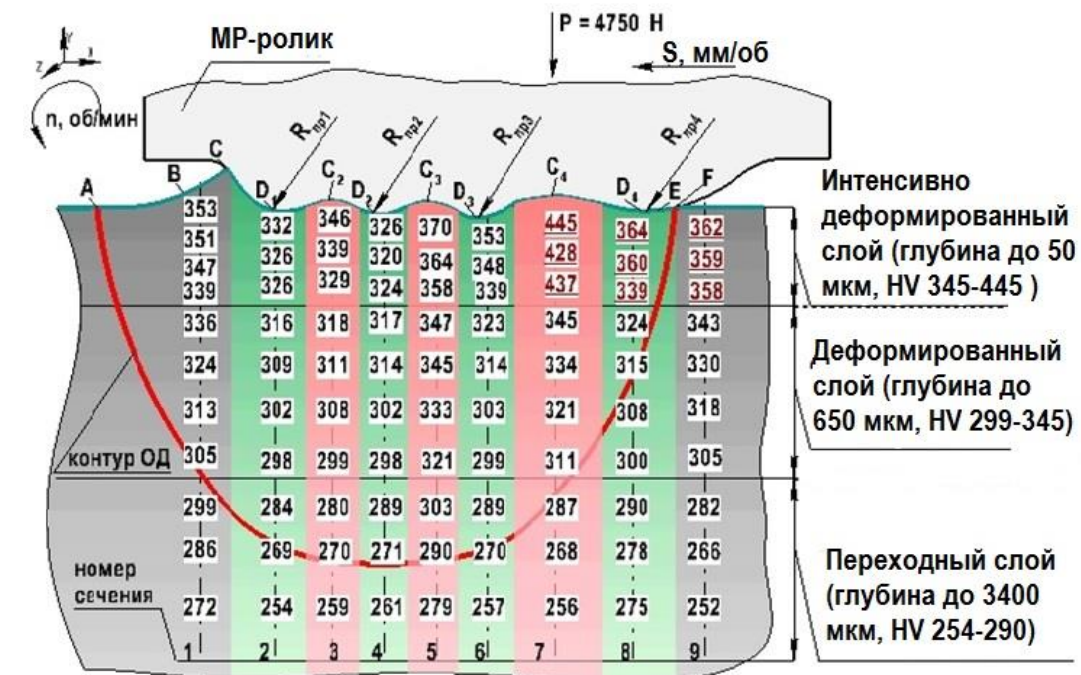
Так, при обработке с усилиями обкатывания 2400-4750 Н, подачей не более 0,07 мм/об и частоте вращения шпинделя 630 об/мин, МР-роликом с профильными радиусами инденторов от

1,0 до 3,0 и осевыми расстояниями между ними от 1,86 до 3,2 мм параметры шероховатости составили: Ra 0,20-0,25 мкм; $Rmax$ не более 2,75 мкм; $Wmax$ не более 10-15,5 мкм. При этом действительные натяги на деформирующие элементы изменялись от 0,05 до 0,15 мм, что не привело к появлению признаков разрушения поверхности (рис. 6, б). Зависимости параметров шероховатости Ra , $Rmax$ от усилия обкатывания выражаются следующими формулами (5-6):

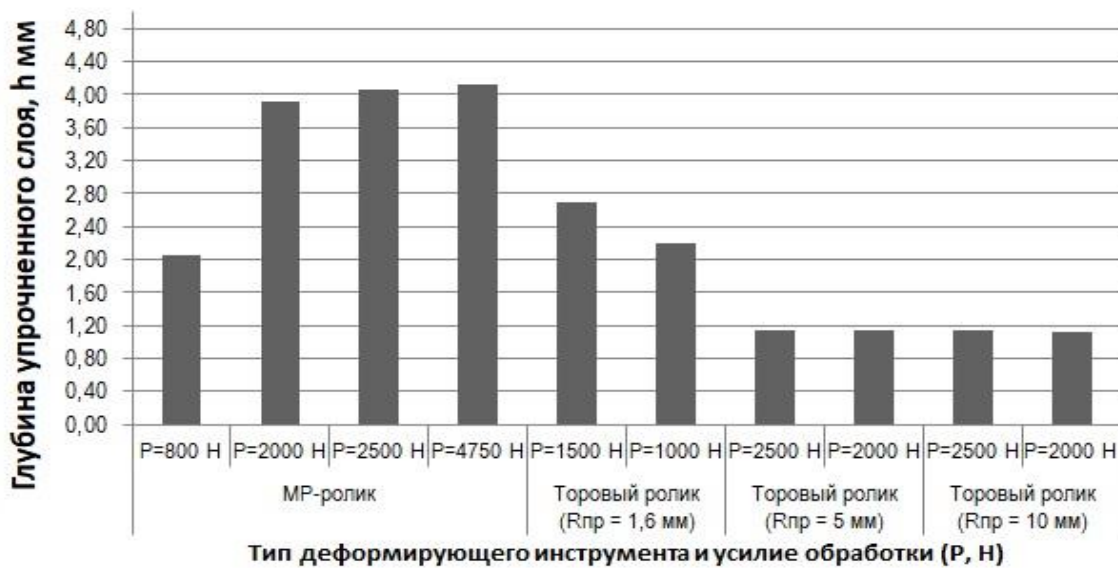
$$Ra = 0,76 - 0,0003 \times P + 4,23 \times 10^{-8} \times P^2 \quad (5)$$

$$Rmax = 5,93 - 0,0019 \times P + 2,37 \times 10^{-7} \times P^2 \quad (6)$$

Установлено, что эффект упрочнения наиболее выражен у границ зерен, преимущественно в тонком поверхностном слое. По сравнению с исходным состоянием стали 45 (HV 160), после обработки МР-роликом наблюдается увеличение микротвердости (до 264-445 HV) не только в тонком поверхностном слое (глубина до 50 мкм), но и на глубине до 3400 мкм (рис. 7).



а)



б)

Рисунок 7. Микротвердость стали 45 после ППД МР-роликом: а) схема распределения микротвердости в очаге деформации; б) диаграммы распределения глубины упрочнения (h , мм) в зависимости от типа обрабатываемого инструмента и усилия обработки

Сопоставляя распределения параметров упрочнения поверхностного слоя после ППД МР-роликом и традиционным торцовым роликом ($R_{пр}$ от 1,6 до 10 мм) при усилиях обработки от 800 до 4750 Н установили, что наибольшие значения глубины упрочнения можно наблюдать при обработке МР-роликом с усилиями от 2500 до 4750 Н. Зависимости параметров упрочнения стали 45 в тонком поверхностном слое HV (на глубине 50 мкм), степени упрочнения δ (%), глубины упрочнения h (мм) от усилия обкатывания выражаются следующими формулами (7-9):

$$HV = 161,93 + 0,07 \times P - 3,05 \times 10^{-6} \times P^2 \quad (7)$$

$$\delta = 0,004 + 0,002 \times P - 1,81 \times 10^{-8} \times P^2 \quad (8)$$

$$h = 0,28 + 0,0022 \times P - 2,91 \times 10^{-7} \times P^2 \quad (9)$$

Методами ОМ и АСМ при исследовании образцов из стали 45 установлено, что от края свободной поверхности (0,01-0,02 мм) обнаружен интенсивно деформированный слой глубиной до 200 мкм (рис. 8). Отличительными особенностями зёрен в упрочненной области являются их «вытянутая» форма в направлении подачи МР-ролика и искривленные границы зерен. АСМ-исследования показали, что при обработке МР-роликом происходит сильная дефрагментация зёрен (глубина до 100 мкм), сопровождающаяся дроблением и расслоением пластинок цемента в перлитных зернах; при этом границы зёрен остаются целыми. Обработка образцов из стали 45 с усилием 4750 Н приводит к измельчению структуры более чем в 3 раза без разрушения поверхностного слоя детали. На рисунке 8 (б, в) приведены аппроксимации, показывающие зависимость размеров зерен от усилия обкатывания. Полученные результаты также подтверждают ранее выдвинутую гипотезу о том, что обработка МР-роликом приводит к измельчению структуры (до $8 \pm 2,5$ мкм, при усилиях 3500-4750 Н), а усилие обкатывания является наиболее значимым технологическим фактором при выборе режима обработки.

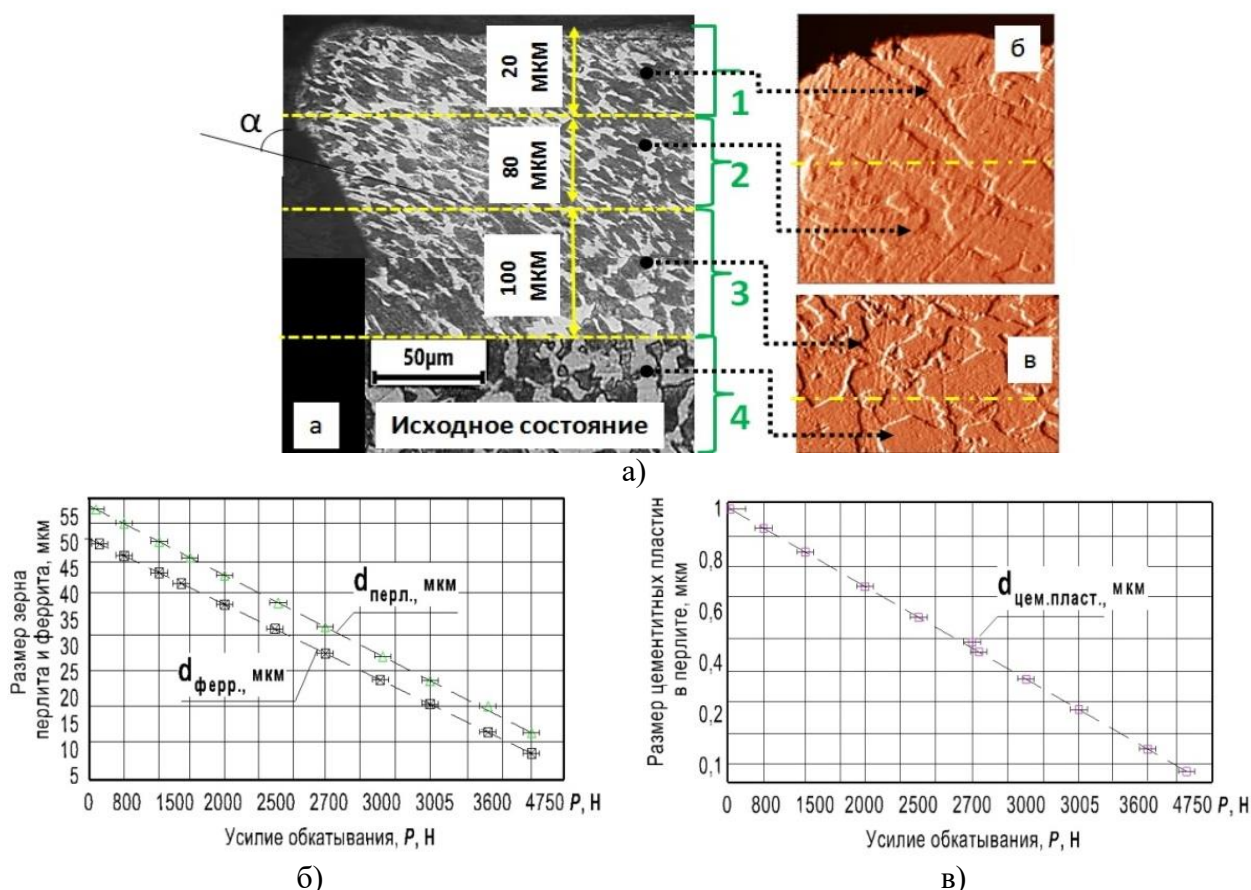


Рисунок 8. Структура стали 45 после ППД МР-роликом: а) ОМ изображения, при увеличении $\times 200$ и $\times 500$ мкм и АСМ скан-изображения; б) аппроксимирующие линейные зависимости размеров зёрен перлита и феррита ($d_{перл.}$, $d_{ферр.}$, мкм) от усилия обкатывания (P , Н); в) аппроксимирующие линейные зависимости размеров цементитных пластинок в перлите ($d_{цем.пласт.}$, мкм) от усилия обкатывания (P , Н)

Результаты рентгеноструктурного анализа (РСА) (рис. 9) позволили идентифицировать зоны перекрытия очагов деформации, а также показали, что обработка ППД МР-роликом с максимальным усилием приводит к существенному увеличению микродисторсии кристаллической решетки и одновременному уменьшению области когерентного рассеивания (табл. 1).

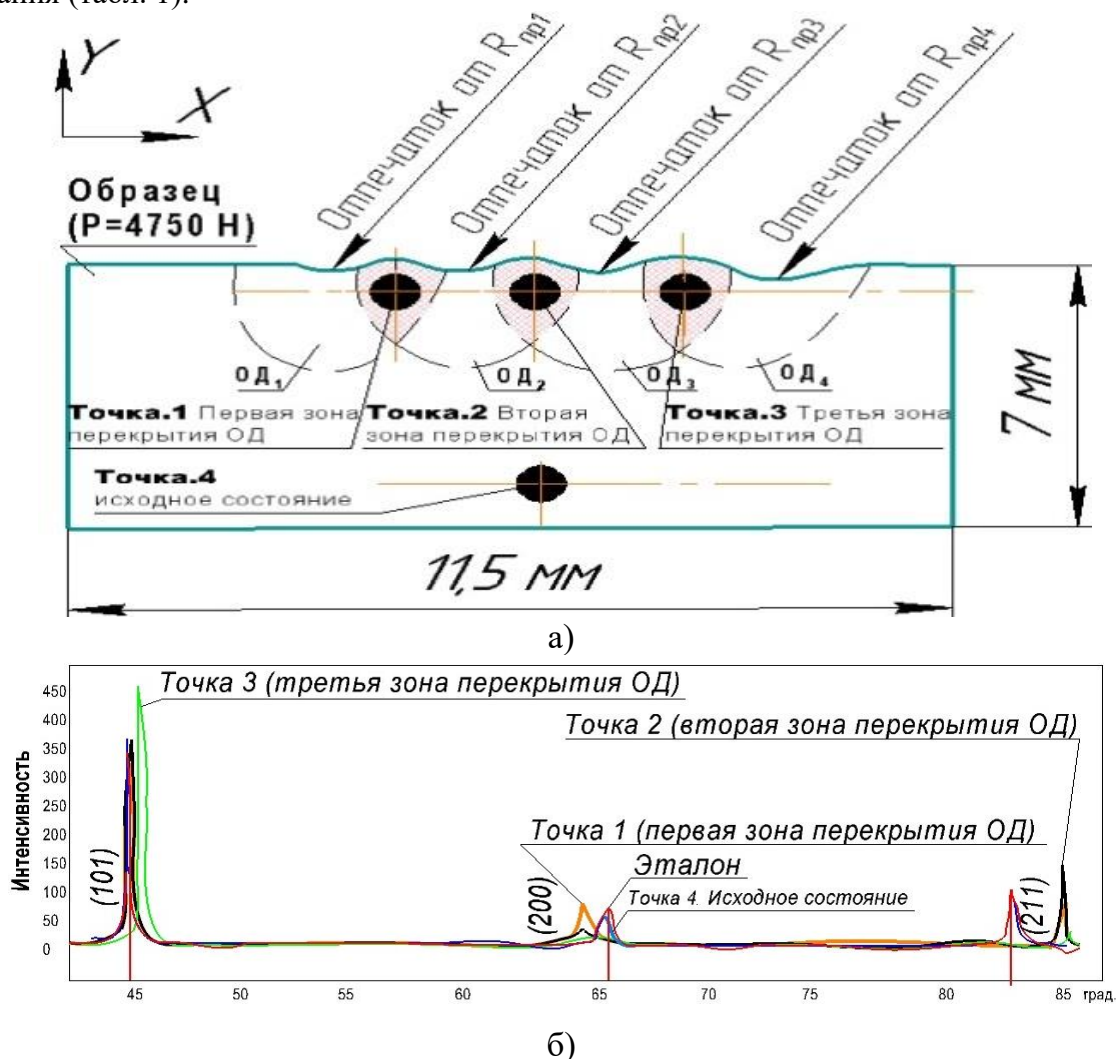


Рисунок 9. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($\text{CuK}\alpha$) поверхностного слоя стали 45 в очаге деформации (с усилием 4750 Н): а) схема исследования образца; б) дифрактограммы в исследуемых точках: т.1 – точка в первой зоне перекрытия очагов деформации; т.2 – точка во второй зоне перекрытия очагов деформации; т.3 – точка в третьей зоне перекрытия очагов деформации; т.4 – исходное состояние стали 45

Таблица 1. Параметры кристаллической решетки, областей когерентного рассеивания и микродисторсии решетки исследуемого образца

| Изменение межплоскостного расстояния, a , Å | | Размеры области когерентного рассеивания (средний размер кристаллитов), D , нм | | Микродисторсия (микроискажения) кристаллической решетки, $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$, 10^{-3} | |
|---|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
| исходное состояние | после внедрения МР-ролика | исходное состояние | после внедрения МР-ролика | исходное состояние | после внедрения МР-ролика |
| Точка № 1 Первая зона перекрытий ОД | | | | | |
| $a = 0,28773$ | $a = 0,28729$ | 71 | 40 | 0,9 | 2,2 |
| Точка № 2 Вторая зона перекрытий ОД | | | | | |
| $a = 0,28773$ | $a = 0,28744$ | 71 | 47 | 0,9 | 1,8 |
| Точка № 3 Третья зона перекрытий ОД | | | | | |
| $a = 0,28773$ | $a = 0,28721$ | 71 | 50 | 0,9 | 1,6 |

Представлены экспериментальные результаты проверки и подтверждена адекватность феноменологической и МКЭ-моделей реальному процессу. Дано обоснование выбора режимов обкатывания, обеспечивающих комплекс требуемых параметров качества поверхностного слоя. Выполнена статистическая обработка и доказана состоятельность предлагаемых экспериментальных зависимостей.

В пятой главе содержатся сведения о практическом применении результатов исследований. Разработаны алгоритм проектирования, технология и сложнопрофильные инструменты (ролики) для поверхностного пластического деформирования, позволяющие использовать исследуемый процесс, как при изготовлении новых, так и при восстановлении изношенных поверхностей эксплуатирующихся деталей машин на универсальных станках и станках с ЧПУ. Для практического применения и реализации полученных результатов работы разработан алгоритм расчета параметров обработки ППД МР-роликом.

Процедуры выполнения этапов разработанных алгоритмов автоматизированы, что позволяет производить расчет параметров ППД МР-роликом 2 способами:

- 1-й способ – прямой аналитический, по исходным данным, которыми являются технологические параметры, устанавливаемые на станке при обработке детали ППД МР-роликом, определяются параметры качества, интегральные параметры механического состояния (Λ , Ψ , $[T_{\text{ост}}]$) с механики технологического наследования;
- 2-й способ – обратный аналитический, при котором определяется режим обработки. Исходными данными являются значения параметров качества поверхностного слоя и долговечности, которые требуется получить при обработке ППД МР-роликом, а также значения технологических факторов, выступающих в качестве ограничений.

Исследования позволили разработать рекомендации по выбору основных конструктивных элементов и установить области рационального применения таких инструментов, как МР-ролик. Конструкция МР-ролика характеризуется следующими параметрами.

1. Наружный диаметр МР-ролика определяется наружным диаметром обрабатываемой детали и в итоге определяет площадь контакта и, соответственно, величины контактных давлений. При этом большему диаметру обрабатываемой детали соответствует и больший диаметр МР-ролика: соотношение диаметров составляет: $D_p=(1,5-2,0) D_d$ при диаметрах обрабатываемой детали от 20 до 50 мм; $D_p=(1,1-1,2) D_d$ при диаметрах детали от 50 до 100 мм.

2. Осевые размеры, расстояния между вершинами инденторов и величины профильных радиусов выбираются из необходимости обеспечения суммарного (от всех инденторов) очага пластической деформации. На этой стадии выбора/конструирования предварительно рассчитываются геометрические размеры очагов деформации в зависимости от профильных радиусов и натягов каждого индентора исходя из результатов ранее выполненных исследований В. М. Смелянского и В. Ю. Блюменштейна). Важно, чтобы граница начала пластического течения от каждого последующего индентора находилась под вершиной (по вертикали) предыдущего индентора.

3. Радиус сопряжения между инденторами (радиус полости – зоны перекрытия) в первом приближении выполняется по правилам графики.

Соотношение усилий и профильных радиусов определяется, как и при традиционной обработке торцовым роликом; большему профильному радиусу соответствуют и большие усилия обкатывания. При этом МР-ролик позволяет работать с существенно большими натягами, достигающими 0,15 мм на индентор, что недопустимо для обработки торцовым роликом. Меньшие натяги от 0,01 до 0,05 мм при профильных радиусах 1 мм назначаются для обработки деталей диаметром до 30 мм. При этом усилия составляют 2000-2500 Н. Это обеспечивает равномерное распределение упрочнения, высокие значения поверхностной микротвердости (до 360 HV) и глубину упрочнения (до 3,0 мм) с размером зерна металла для среднеуглеродистой стали 15-20 мкм. Большие натяги от 0,05 до 0,15 мм и более применяются для деталей диаметром до 100 мм при усилиях от 3 000 до 4 750 Н. Такая обработка обеспечивает формирование гетерогенной структуры с мелким зерном (9-13 мкм) при большей глубине упрочнения до 4,0 мм и более при гарантированном отсутствии разрушения поверхностного слоя детали.

Приведены примеры расчетов и применения результатов теоретических и экспериментальных исследований для проектирования технологического процесса обработки ППД МР-роликом; показана возможность обеспечения благоприятного комплекса физико-механических свойств металла поверхностного слоя обрабатываемой детали. Проведена промышленная апробация результатов исследования в условиях ООО «ОКС» (г. Кемерово) при разработке технологических процессов изготовления деталей горно-шахтного оборудования и технологической оснастки. Спроектировано, изготовлено и внедрено специальное приспособление, используемое на токарных станках с ЧПУ. Использование результатов теоретических и экспериментальных исследований и разработанных специальных приспособлений для ППД МР-роликом позволили повысить качество изделий из конструкционных легированных сталей: шероховатость составила Ra 0,20-0,25 мкм (при исходной 3,8-4 мкм); твердость по Виккерсу (при $HV_{исх}$ 180-185) повысилась не менее чем на 35-45%; глубина упрочнения на деталях диаметром до 90 мм составила не менее чем 3,6 мм. Предложенные научные и технологические решения в процессе проведения цеховых испытаний позволили повысить долговечность в условиях приложения циклических нагрузок примерно в 1,8 раза. Проведена промышленная апробация технологии на примере валов и защитных втулок вентиляционных насосов, применяемых на опасных производственных объектах химического и горно-шахтного профиля (предприятие ООО «МАШ-СЕРВИС», г. Кемерово). В частности, при ремонте защитной втулки центробежного насоса повышен ресурс изделия более чем в 15 раз по сравнению с новыми изделиями, что подтверждено актом внедрения. В результате проведенных испытаний установлено, что применение ППД МР-роликом обеспечило низкую шероховатость (до Ra 0,251-0,289 мкм), благоприятный микрорельеф и повышение микротвердости испытываемых деталей в 1,5 раза. Кроме того, предложенная технология ремонта увеличила срок службы изделий в 1,2-1,5 раза, что превышает показатели применения стандартной технологии восстановления. Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению в виде методик, программных систем расчета и технологических процессов с суммарным годовым экономическим эффектом около 450 тысяч рублей.

В заключении изложены основные результаты исследования.

В приложениях приведены справки об использовании и апробации результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны технологические основы финишной отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием мультирадиусным роликом, устанавливающие технологические факторы процесса обработки, эффективные условия его реализации, методы расчёта показателей качества поверхности и практические рекомендации по использованию процесса в технологических процессах изготовления и ремонта деталей.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Результаты проведенных научных исследований и предложенные для практического применения технологические рекомендации упрочняюще-чистовой обработки мультирадиусным роликом позволяют повысить эффективность поверхностного пластического деформирования, а также повысить качество поверхностного слоя путем создания мелкозернистой структуры металла на завершающей стадии обработки.
2. Выдвинута, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена научная гипотеза, заключающаяся в обеспечении высокого гидростатического давления в очаге деформации за счет создания сложного напряженно-деформированного состояния путем применения оригинальной схемы нагружения поверхностного слоя мультирадиусным роликом, обеспечивающей высокий уровень накопленных деформаций, остаточных напряжений и мелкозернистой структуры без разрушения металла поверхностного слоя детали.
3. Разработаны структурная и феноменологическая модели процесса ППД МР-роликом и выполнен теоретический расчет напряженно-деформированного состояния очага деформации и упрочненного поверхностного слоя. Показано, что оригинальная схема нагружения позволяет

обеспечить высокое гидростатическое давление до -1010 МПа в зонах перекрытия очагов деформации в полостях между деформирующими элементами мультирадиусного ролика.

4. Исследованиями показано, что мультирадиусный инструмент позволят применять натяги деформирующих элементов до уровня 0,15 мм и более, недостижимые при обработке традиционными деформирующими инструментами. В совокупности это обеспечивает высокий упрочняющий эффект, заключающийся в накоплении степени деформации сдвига до $\Lambda=7,2$, обеспечении осевого компонента остаточных напряжений до -966 МПа при относительной низкой степени исчерпания запаса пластичности $\Psi=0,7$ без разрушения металла поверхностного слоя детали.

5. Разработана программа, проведены экспериментальные исследования и установлены закономерности формирования качества поверхностного слоя при обработке ППД МР-роликом. Установлено, что шероховатость поверхности в зависимости от режимов составляет Ra 0,218-0,223 мкм, микротвердость образцов из стали 45 – до 445 HV, армко-железа –160-180 HV; при этом глубина упрочнения достигает 4,1 мм при степени упрочнения 70 %.

6. Впервые методами оптической, атомно-силовой микроскопии и рентгеноструктурного анализа установлено влияние напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя металла на формирование структурно-фазового состояния металла поверхностного слоя стали 45 и армко-железа. Показано, что обработка ППД МР-роликом приводит существенному увеличению микродисторсии кристаллической решетки и одновременному существенному уменьшению области когерентного рассеивания в зонах перекрытия зон очага деформации с преобладающим высоким гидростатическим давлением, что приводит к формированию наноразмерной структуры металла.

7. Разработаны алгоритм проектирования, технология и сложнопрофильные инструменты (ролики) для поверхностного пластического деформирования, позволяющие использовать исследуемый процесс, как при изготовлении новых, так и при восстановлении изношенных поверхностей эксплуатирующихся деталей машин на универсальных станках и станках с ЧПУ. Промышленная апробация, выполненная при изготовлении и ремонте валов и защитных втулок насосов, применяемых на опасных производственных объектах ООО «ОКС» (г. Кемерово) и ООО «МАШСЕРВИС» (г. Кемерово), показала возможность повышения ресурса изделия более чем в 15 раз по сравнению с новыми изделиями.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Патенты

1. Патент РФ № 2792331. Сборный сложнопрофильный инструмент для поверхностного пластического деформирования: пат. 2792331 Рос. Федерация. № 2022121903; заявл. 12.08.2022; опублик. 21.03.2023, Бюл. № 9. 8 с.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Митрофанова К.С. Влияние поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом на структурно-фазовое состояние и микротвердость образцов из стали 45 / К.С. Митрофанова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2022. – № 3 (151). – С. 4-12.

2. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Рентгеноструктурные исследования поверхностного слоя армко-железа после обкатывания мультирадиусным роликом / В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и покрытия. –2022.–Т. 18. –№ 3 (207). –С. 110-115.

3. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Особенности структурно-фазового состояния поверхностного слоя образцов из стали 45 после обкатывания мультирадиусным роликом / В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и покрытия. –2022. –Т. 18. –№ 4 (208). –С. 170-175.

4. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Исследование влияния технологических факторов процесса поверхностного пластического деформирования сложно профильным инструментом на качество поверхностного слоя / В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и покрытия. –2020. –Т. 16. –№ 2 (182). –С. 68-74.

5. Митрофанова К.С. Исследование патентной активности в области технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и покрытия. –2019. –Т. 15. –№ 12 (180).– С. 572-576.

Статьи в зарубежных изданиях Scopus, Web of Science

1. Blumenstein V. Yu., Mitrofanova K. S. Study on the effects of hydrostatic pressure on the structural state of pure iron during hardening treatment with a multiradius roller / V. Yu. Blumenstein, K.S. Mitrofanova// Solid State Phenomena. – 2022. – Vol. 328. – P. 17-25.
2. Blumenstein V. Y., Mitrofanova K. S. Study of the parameters of the pure iron structure after surface plastic deformation treatment with a complex-profile tool / V. Yu. Blumenstein, K.S. Mitrofanova// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 16. "Dynamics of Technical Systems, DTS 2020". – 2021. –P. 012013.
3. Mitrofanova K.S. Study of surface layer hardening after treatment complex tool / K.S. Mitrofanova // Solid State Phenomena. –2020. – Vol. 303. –P. 89-96.
4. Krechetov, Mitrofanova K. The study of multiradius roller running process / A. Krechetov, K. Mitrofanova// MATEC Web of Conferences. The conference proceedings (ISPCIME-2019). –2019. –P. 05003.

Материалы и тезисы докладов

1. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Формирование микроструктуры и механических свойств стали 45 в условиях высокого гидростатического давления при поверхностном пластическом деформировании мультирадиусным роликом /В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении». Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. – 2022. – С.245-251.
2. Блюменштейн В. Ю., Митрофанова К. С. Рентгеноструктурный анализ образцов из армо-железа после упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом / В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича. Под редакцией С.И. Василевской, Ю.С. Кудрявцевой. Новосибирск.– 2021. – С. 412-418.
3. Митрофанова К. С. Определение параметров отпечатков пластически деформированной области при обработке мультирадиусным роликом / К. С. Митрофанова // В сборнике: Машиностроительные технологические системы. Сборник трудов Международной научно-технической конференции. – 2021. –С. 47-51.
4. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Особенности формирования микроструктуры поверхностного слоя армо-железа после поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом /В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // В сборнике: Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий. Сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей. ДГТУ. –2021. – С. 72-77.
5. Митрофанова К. С. Обеспечение качества ответственных деталей машин в процессе упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом / К. С. Митрофанова // В книге: Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов. Санкт-Петербург. – 2021. –С. 137-138.
6. Механика формирования и трансформации остаточных напряжений при контактном взаимодействии инструмента и обрабатываемого металла как основа построения цифровых теней и разработки предпосылок создания цифровых двойников технологических процессов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): / Российский фонд фундаментальных исследований; рук. Блюменштейн В.Ю. – 2020. – 184 с. – Исполн.: Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С., Останин О.А., Митрофанова К.С., Коротин В.О., Учайкин С.Е. – № ГР 20-08-00587. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47288173>. – Дата публикации: 10.12.2021.
7. Митрофанова К. С. Анализ упрочненного поверхностного слоя после обработки сложнопрофильным и торовыми инструментами / К. С. Митрофанова// В сборнике: Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники. Материалы Международной научно-технической конференции. БГТУ. – 2020.–С. 213-217.
8. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Атомно-силовая микроскопия образцов из стали 45 после поверхностного пластического деформирования сложнопрофильным инструментом /В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // В сборнике: Инновации в машиностроении (ИнМаш-2020). Материалы XI Международной научно-практической конференции. Бийск.–2020. –С. 261-267.
9. Митрофанова К.С. Оценка напряженно-деформированного состояния упрочненного поверхностного слоя после ППД сложнопрофильным инструментом / К. С. Митрофанова// В сборнике: Россия молодая. Сборник материалов XII Всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. Кемерово.–2020. –С. 31603.1-31603.4.
10. Митрофанова К.С. Влияние геометрии сложнопрофильного инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя / К. С. Митрофанова// В сборнике: Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий. Сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей. –2020. –С. 443-451.
11. Митрофанова К.С. Уточненная конечно-элементная модель процесса отделочно-упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом / К. С. Митрофанова// В сборнике: Инновации в технологиях и образовании. Сборник статей участников XIII Международной научно-практической конференции. Белово.–2020. –С. 214-219.
12. Митрофанова К.С. Анализ способов получения ультрамелкозернистой структуры материала / К. С. Митрофанова// В сборнике: Россия молодая. Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2019.– С. 40502.
13. Митрофанова К.С. Исследование качества поверхностного слоя стали 45 после поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом / К.С. Митрофанова // В сборнике: Инновации в машинострое-

нии. Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. –2019.– С. 639-645.

14. Митрофанова К.С. Исследование качества поверхностного слоя при обработке мультирадиусным деформирующим инструментом / К.С. Митрофанова // В сборнике: Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации). Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. –2018.– С. 21-29.

15. Блюменштейн В. Ю., Митрофанова К. С. Анализ напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при обработке поверхностным пластическим деформированием / В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // В сборнике: Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении. Сборник трудов IV Всероссийской молодежной научно-практической школы с международным участием. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. –2018.–С. 24.1-24.4.

16. Митрофанова К.С. Оценка микроструктурных изменений после ППД инструментом специального профиля / К.С. Митрофанова // В сборнике: Сборник материалов X Всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – 2018.– С. 32009.1-32009.6.

17. Митрофанова К.С. Современное состояние и перспективы развития процессов ППД / К.С. Митрофанова // В сборнике: Инновации в машиностроении. Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. Под редакцией А.М. Маркова, А.В. Балашова, М.В. Доц.– 2018.– С. 418-423.

18. Блюменштейн В. Ю., Митрофанова К. С. Анализ влияния запаса пластичности на накопление деформаций при ППД сложнопрофильным инструментом /В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // В сборнике: Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении. Сборник трудов III Всероссийской молодежной научно-практической конференции. –2017. –С. 111.

19. Митрофанова К.С. Исследование поверхностного слоя металла после упрочнения методом ППД с применением сложнопрофильного инструмента / К.С. Митрофанова // В сборнике: Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». –2017. – С. 36003.

20. Блюменштейн В. Ю., Митрофанова К. С. Моделирование процесса упрочняющего обкатывания сложнопрофильным инструментом / В. Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // В сборнике: Инновации в машиностроении. Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции. –2017. –С. 528-537.

21. Митрофанова К.С. Конечно-элементное моделирование поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом / К.С. Митрофанова // В сборнике: Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении. Сборник трудов II Всероссийской молодежной научно-практической школы. – 2016. – С. 1.

22. Митрофанова К.С. Модификация поверхностного слоя детали обработкой сложнопрофильным инструментом / К.С. Митрофанова // В книге: Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Новые конструкционные материалы. Научный руководитель секции А.А. Батаев. –2016. –С. 20.

23. Митрофанова К.С. Совершенствование технологического процесса упрочняющей обработки штоков гидроцилиндра / К.С. Митрофанова // В сборнике: Россия молодая. Сборник лучших статей VIII Всероссийской, 61 научно-практической конференции молодых ученых. Кемерово. – 2016. –С. 68.

24. Митрофанова К.С. Разработка упрочняющего технологического процесса обработки поверхностным пластическим деформированием штоков домкратов гидроцилиндров / К.С. Митрофанова // Сборник трудов Всероссийской молодежной научно-практической школы. –2015.– С. 10.

Подписано в печать 26.04.2023 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная

Усл. печ. л. 1,16 Уч. изд. л. 1,1 Тираж 100 экз. Заказ _____

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

Отпечатано в издательском центре КузГТУ

650000, г. Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а